



Titre: Conception d'un distillateur solaire pour le traitement des effluents
Title: d'une tannerie mexicaine

Auteur: Julie Beauséjour
Author:

Date: 2003

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Beauséjour, J. (2003). Conception d'un distillateur solaire pour le traitement des
Citation: effluents d'une tannerie mexicaine [Master's thesis, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7105/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7105/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

In compliance with the
Canadian Privacy Legislation
some supporting forms
may have been removed from
this dissertation.

While these forms may be included
in the document page count,
their removal does not represent
any loss of content from the dissertation.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE POUR LE TRAITEMENT DES
EFFLUENTS D'UNE TANNERIE MEXICAINE

JULIE BEAUSÉJOUR
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
JUN 2003



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitions et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-612-86379-4

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-86379-4

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CONCEPTION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE POUR TRAITER
LES EFFLUENTS D'UNE TANNERIE MEXICAINE

présenté par : BEAUSÉJOUR Julie

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme MILLETTE Louise, Ph.D., présidente

M. DELISLE Claude, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. HAUSLER Robert, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. CONRAUD Thierry, Ph.D., membre

Remerciements

L'auteure désire remercier en premier lieu le fonds de recherche sur la nature et les technologies pour le soutien financier au cours de la maîtrise. Je tiens également à remercier sincèrement mes co-directeurs de recherche, Dr. Claude Delisle et Dr. Robert Hausler, ainsi que la présidente de mon comité de défense, Dr. Louise Millette.

Je remercie aussi personnellement la famille Hernandez-Jaime, propriétaires de la tannerie Migara pour leur entière collaboration et en particulier Eduardo Hernandez Jaime, *lic.*, l'investigateur du projet. Au cours de mon travail de terrain, plusieurs personnes m'ont été d'un grand support, dont Dr. Thierry Conraud, professeur de l'université de Guanajuato, Marylène Cormier, assistante de recherche et les nombreux responsables et employés de la tannerie. Finalement merci à ma famille pour le support constant à mes idées et projets.

Gracias a la familia Hernandez Jaime por su cariño y ricas comidas. Gracias a Marylene por su constante amistad. Gracias a Ma Eugenia, Israel y León por el soporte, las ideas y las platicas. Gracias a Thierry por su dinamismo, soporte constante e ideas locas. Finalmente, gracias a Eduardo por haber hecho este proyecto realidad, tu soporte y numerosas ideas innovadoras.

La única decisión de poner en marcha esta idea idealista demuestra un gran sentido de apertura y innovación que vale la pena ser subrayado.

L'unique décision de réaliser ce projet jusqu'au bout démontre une grande ouverture et un esprit d'innovation qui doit être souligné. Merci à vous.

Résumé

Cinq prototypes de distillateurs solaires ont été construits et testés dans le but de traiter l'eau usée d'une tannerie de la ville de León, au Mexique. Les prototypes ont été construits selon le contexte socio-économique mexicain : des matériaux peu coûteux, un fonctionnement simple, un entretien facile et l'utilisation d'une source d'énergie gratuite, abondante et renouvelable, l'énergie solaire. Les essais sur les cinq prototypes ont démontré une capacité d'évaporation optimisée par des concentrateurs solaires. La capacité de condensation est restée modeste sur les prototypes construits. Un condensateur de type échangeur de chaleur a donc été conçu théoriquement, ce qui permettrait d'atteindre la condensation de 85% des 20 litres d'eau évaporée quotidiennement, soit la distillation de 17 litres d'eau par jour. Pour cet évaporateur de $1,93 \text{ m}^2$, cette production signifierait un rendement de $8,8 \text{ litres/m}^2\text{-jour}$.

Abstract

In Leon Mexico, five solar distillation prototypes were built and tested in order to treat tannery waste water. The prototypes were built according to the Mexican socio-economic context: Low cost materials, simple operation and maintenance, as well as the use of a free, abundant and renewable energy source, solar energy. The trials on the prototypes have shown an evaporation capacity that is optimized by the solar concentrators located under the wastewater canal. However, the condensation capacity was much lower on the homemade prototypes. A theoretical heat exchanger type condenser has been conceived which would be able to condense 85% of the 20 litres of water evaporated daily, for a total of 17 litres of water distilled. For a 1,93 m² evaporator, this level of production represents a yield of 8,8 litres/m²-day.

Table des matières

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES ANNEXES.....	XIII
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : ÉTAT DES CONNAISSANCES	4
2.1 Contexte.....	4
2.1.1 Les tanneries dans l'économie régionale de León	4
2.1.2 Situation environnementale.....	5
2.1.3 Situation politique	7
2.2 Énergie solaire au Mexique	9
2.3 Procédé de tannage du cuir	11
2.3.1 Caractérisation des effluents	11
2.3.2 Toxicité.....	12
2.4 Les traitements des effluents de tanneries	14
2.5 L'évaporation pour le traitement des eaux usées de tanneries	14
2.5.1 Boues de stations d'épuration	15
2.5.2 Pâtes et papier.....	16
2.5.3 Comparaison d'effluents industriels.....	16
2.5.4 Facteurs limitatifs.....	17
2.6 Distillation solaire.....	18
2.6.1 Principes de base des distillateurs solaires.....	18
2.6.2 Résultats types obtenus avec les distillateurs à bassin simple	20
2.6.3 Théorie de l'évaporation	22
2.6.4 Facteurs affectant l'évaporation de surface.....	24

2.6.5 Facteurs affectant la condensation	26
2.6.6 Modifications pour amélioration de l'évaporation.....	27
2.6.7 Modifications pour amélioration de la condensation	28
2.7 Évaporation solaire sur des eaux de tanneries	30
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE.....	33
3.1 Objectif du design.....	33
3.2 Matériaux et outils disponibles.....	33
3.3 Main d'œuvre.....	34
3.4 Conception des prototypes.....	34
3.5 Essais	35
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS.....	37
4.1 Conception des prototypes.....	37
4.1.1 Concentrateur de rayons solaires avec canal ouvert.....	37
4.1.2 Concentrateur isolé avec canal semi-fermé.....	42
4.1.3 Concentrateur avec condensateur externe	43
4.1.4 Condensateur 2	45
4.1.5 Condensateur 3	47
4.2 Résultats des essais	48
4.2.1 Concentrateur de rayons solaires avec canal ouvert.....	48
4.2.2 Concentrateur isolé avec canal semi-fermé.....	50
4.2.3 Concentrateur avec condensateur externe	51
4.2.4 Condensateur 2	52
4.2.5 Condensateur 3	53
4.2.6 Comparaison des résultats des essais	55
4.3 Unité de distillation théorique	56
4.3.1 Échangeur de chaleur à double tuyau.....	56
4.3.2 Les données du problème	57
4.3.3 Définition des variables et Analyse théorique.....	58
4.3.4 Calcul des variables.....	60

4.3.5 Résumé des caractéristiques du condensateur.....	63
4.4 Coûts	65
CHAPITRE 5 : DISCUSSION.....	66
5.1 Discussion des résultats des essais sur les prototypes	66
5.1.1 Concentrateur de rayons solaires avec canal ouvert.....	66
5.1.2 Canal semi-fermé	67
5.1.3 Concentrateur avec condensateur externe	71
5.1.4 Condensateur externe 2	70
5.1.5 Condensateur externe 3	72
5.1.6 Unité de distillation théorique	73
5.2 Avancées en évaporation et en condensation	74
5.2.1 Évaporation	74
5.2.2 Condensation.....	75
5.3 Application du système pour les tanneries	76
5.3.1 Application à moyenne ou grande échelle	76
5.3.2 Effets sur la consommation d'eau propre.....	78
5.3.3 Effets sur la contamination environnementale	78
5.4 Autres applications	80
CHAPITRE 6 : CONCLUSION	82
RÉFÉRENCES.....	84
ANNEXES.....	90

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Normes de rejet du règlement sur l'utilisation du réseau d'égout de la ville de León, Guanajuato	6
Tableau 2.2 : Moyenne quotidienne de radiations solaires globales de 1977	10
Tableau 2.3 : Étapes de fabrication du cuir	12
Tableau 2.4 : Caractérisation des eaux usées des tanneries d'Istanbul	13
Tableau 2.5 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées d'épilage-pelanage et du tannage de chrome	13
Tableau 2.5 : Pertes d'énergie dans un distillateur de type bassin	20
Tableau 4.1 : Tableau comparatif des résultats des essais sur les cinq prototypes	55
Tableau 4.2 : Caractéristiques de l'unité de condensation théorique	64
Tableau 4.3 : Coûts de construction du distillateur	65
Tableau 5.1 : Radiations solaires globales à Mexico de 1977-1992 et 2002	67

Liste des figures

Figure 2.1 :	Diagramme de transfert d'énergie dans un distillateur solaire de type bassin.....	19
Figure 2.2 :	Pression de saturation de vapeur en fonction de la température	23
Figure 2.3 :	Densité de vapeur au point de saturation en fonction de la température, à pression atmosphérique constante et la relation empirique déduite	23
Figure 2.4 :	Taux d'évaporation du distillateur et de l'évaporateur solaire sous les mêmes conditions.....	24
Figure 2.5 :	Facteurs affectant l'évaporation de l'eau d'une surface libre	25
Figure 2.6 :	Taux de distillation selon la différence entre la température de l'eau et la température de la vitre	26
Figure 2.7 :	Champ de concentrateurs de la centrale d'électricité solaire de Kramer Junction, Californie, USA	29
Figure 2.8 :	Détails des concentrateurs de la centrale d'électricité solaire de Kramer Junction, Californie, USA	29
Figure 4.1 :	Angle du soleil nécessaire à la concentration des rayons sur le canal pour une orientation Nord-Sud de l'appareil	38
Figure 4.2 :	Angle du soleil à Leon, Mexique, 4 juin 2002	39
Figure 4.3 :	Coupe de l'appareil.....	41
Figure 4.4 :	Photographie de l'appareil assemblé sur le toit de la tannerie	42
Figure 4.5 :	Illustration du système de circulation d'air	44
Figure 4.6 :	Schéma de la nouvelle configuration	47
Figure 4.7 :	Configuration du système de circulation d'air par succion du ventilateur	48
Figure 4.8 :	Température de l'eau usée et volume d'eau distillée pour le concentrateur avec canal ouvert durant une journée ensoleillée	49
Figure 4.9 :	Variation de la température de l'eau et de l'humidité relative avec le canal semi-fermé	50

Figure 4.10 : Résultats des essais avec le concentrateur avec circulation de vapeurs jusqu'à un condensateur externe	52
Figure 4.11 : Résultats des essais avec le concentrateur et le deuxième condensateur externe	53
Figure 4.12 : Résultats des essais avec le concentrateur et le troisième condensateur externe	54
Figure 4.13 : Graphique comparatif des capacités d'évaporation et de condensation des cinq prototypes	55

Liste des annexes

Annexe A : Plans du distillateur.....	90
Annexe B : Photos des prototypes	92

Chapitre 1 : Introduction

Une grande partie des eaux usées contaminées provient des eaux de rejet de différentes industries. Cette situation est des plus problématiques dans les pays en voie de développement où la contamination est souvent ni traitée, ni réglementée adéquatement. La situation économique précaire dans ces régions empêche l'application de normes environnementales sévères qui impliqueraient l'achat de coûteux systèmes de traitement des eaux usées pour les industries. Le Mexique ne fait pas exception et plusieurs nappes phréatiques démontrent déjà un haut niveau de contamination provenant de différents milieux.

Le Mexique génère approximativement 4% de la production mondiale de cuir. Il se situe parmi les dix plus grands producteurs de cuir au monde. La tradition artisanale de l'élaboration de produits de cuir, en plus de la disponibilité de la matière première et de la main d'œuvre, ont favorisé le développement de cette industrie au Mexique depuis plusieurs décennies. L'état de Guanajuato est maintenant le plus grand producteur du pays, avec 70% du cuir produit. La ville de León possède à elle seule plus de 800 tanneries (la moitié des tanneries mexicaines) et la production de cuir constitue sa principale activité économique.

L'impact environnemental des tanneries de León s'est intensifié avec les longues périodes de rejets des déchets industriels directement dans l'environnement. Une station d'épuration municipale traite biologiquement l'ensemble des eaux usées de la municipalité, mais la station ne fonctionne que par intermittence et les eaux tirées des nappes phréatiques comportent un haut niveau de sel provenant des tanneries.

La tannerie Migara est située à León. Propriété de la famille Hernandez Jaime depuis plus de 40 ans, elle emploie aujourd'hui 30 personnes et produit 300 peaux bovines tannées par semaine. Tout comme la majorité des tanneries de León, ils utilisent un procédé de tannage au chrome. Ce chrome se retrouve en grande partie dans les eaux rejetées, en compagnie d'une forte charge de sel, de résidus animaux, des sulfures, du chrome, des acides et de l'huile. Avant le rejet à l'égout, l'eau usée est décantée et les boues ainsi recueillies sont retirées deux fois l'an et disposées au champ de boues local.

Les dirigeants de la tannerie étaient conscients des effets de leurs eaux usées sur l'environnement et voulaient développer un outil de traitement de leurs effluents adapté au contexte industriel mexicain. Leur but premier était de purifier une partie des eaux usées pour la réutiliser dans le procédé et diminuer leur consommation d'eau propre, qu'ils achètent quotidiennement. Dans un deuxième ordre, le système les aiderait à diminuer leurs rejets de contaminants et prévenir les amendes annoncées par la société municipale de l'eau. Ils connaissaient le principe de la distillation solaire utilisée pour l'eau salée et désiraient en faire l'essai avec leurs effluents fortement chargés. L'objectif à court terme des dirigeants de la tannerie était d'utiliser le système de traitement sur place, mais par la suite de distribuer la technologie aux autres tanneurs de León grâce à leurs contacts privilégiés avec la chambre d'industrie des tanneurs.

Le but du design était de concevoir un distillateur différent des distillateurs plats traditionnels, plus efficace. Pour ce faire, le distillateur devait rencontrer les contraintes locales. L'appareil devait être simple d'utilisation et d'entretien, et ne contenir que des matériaux peu coûteux, disponibles et faciles à manipuler. L'utilisation d'un ventilateur, par exemple, était limitée à un moteur de faible puissance qui pouvait fonctionner avec la seule énergie produite par une pile solaire.

L'expérimentation a eu lieu dans la petite entreprise familiale de León. Il s'agissait du premier projet de recherche à se dérouler dans la tannerie et le premier contact avec la recherche pour la plupart des responsables et employés. L'environnement de travail du projet était aussi très différent d'un milieu de recherche universitaire régulier. Les outils mis à la disposition du projet étaient limités aux outils nécessaires aux opérations de maintenance de l'équipement de l'usine. Les matériaux commandés pouvaient tarder plusieurs jours ou même plusieurs semaines après la date de livraison entendue.

Malgré tout, il a été important tout au long du projet de maintenir les objectifs établis par le partenaire industriel. Durant leurs années d'expérience familiale dans l'industrie, ils ont vu passer des dizaines de technologies non-adaptés au contexte mexicain. Le financement accordé à ce projet démontrait aussi une volonté plutôt inhabituelle qui suggérait une assurance que la technologie serait pleinement utilisée car elle répondait enfin à leurs besoins réels.

Les technologies simples ont été les réponses à plusieurs problèmes environnementaux de pays du tiers-monde. Quoique souvent moins rapides et efficaces, ces technologies laissent de côté la haute technologie et ses prix exorbitants pour utiliser des mécanismes simples, de faibles demandes en énergie ou des sources d'énergie gratuites et un coût de base très abordable. Les moulins à eau, les capteurs de brouillard et de pluie, la désinfection solaire et la distillation solaire en sont des exemples. La distillation solaire pourrait être appropriée pour traiter des effluents de tanneries. Déjà utilisée en production d'eau potable et dessalement de l'eau de mer, la distillation solaire permet d'utiliser l'énergie solaire pour évaporer et condenser l'eau pure, tout en déshydratant et concentrant les matières qui y étaient en suspension et dissoutes. Le Mexique, comme plusieurs pays en voie de développement, bénéficie d'un grand apport d'énergie solaire et plusieurs spécialistes recommandent le développement de cette source d'énergie renouvelable.

Chapitre 2 : État des connaissances

La distillation solaire permet d'utiliser la stricte énergie solaire pour évaporer et condenser l'eau pure, tout en déshydratant et concentrant les matières qui y étaient en suspension et dissoutes. Cette technologie simple déjà utilisée pour purifier l'eau salée serait appropriée pour les industries mexicaines et peut être adaptée pour le traitement des effluents de tanneries.

2.1 Contexte

2.1.1 *Les tanneries dans l'économie régionale de León*

Avant tout, il est nécessaire de replacer les tanneries de León dans leur contexte national et régional. L'industrie du cuir est un des plus importants secteurs d'activité économique du Mexique, avec une part de 8.6% du PIB national par secteur d'activité. L'état de Guanajuato représente 70% de la production nationale de cuir (INEGI, 1994). La production de cuir constitue la principale activité économique de la région de León. Selon un recensement réalisé par l'IEEG (1998), plus de 800 tanneries sont établies à León, dont plus de 90% sont des micro-tanneries de type familial. Ces micro-tanneries sont pour la plupart situées au centre-ville de León, au rez-de-chaussée des résidences des familles propriétaires. Les plus grandes tanneries, de plus de 15 employés, sont plutôt situées en périphérie du centre. La politique de développement économique régionale vise la relocalisation graduelle de ces entreprises dérangeantes (par les odeurs, le bruit et la pollution) vers un parc industriel récemment acheté par la ville. Cette mutation de l'industrie du cuir sera pourtant très lente car les propriétaires des micro-tanneries ne sont pas prêts à quitter la proximité du centre-ville, des services, de leurs fournisseurs et clients. De plus, des médias locaux ont rapporté que le terrain du parc industriel des tanneries serait instable et ne permettrait pas la construction, à un coût raisonnable, de bâtiments industriels. En 2002, ce terrain était toujours vide. Cette période d'incertitude économique et

politique limite donc la capacité des tanneurs à se doter d'infrastructures de traitement permanentes et coûteuses. Ils recherchent plutôt des solutions flexibles et adaptées à leur situation.

Plusieurs aspects sociaux et économiques ont contribué à créer des pratiques industrielles bien peu respectueuses de l'environnement. Les tanneries ne profitent pas d'un roulement financier adéquat, leurs sources de crédit adaptées sont extrêmement réduites et leur personnel possède un très faible niveau de formation.

2.1.2 Situation environnementale

Les tanneurs de León utilisent environ 20 litres d'eau pour produire 1 kg de cuir. Ils achètent cette eau d'entrepreneurs locaux qui la soutirent de puits privés et qui la livrent par dizaines de camions citerne aux tanneries. Les tanneries rejettent un volume d'eau usée équivalent à la quantité d'eau consommée lors du procédé de tannage car l'eau utilisée pour les solutions est totalement purgée à la fin du procédé. Les effluents rejetés contiennent de fortes concentrations en sulfures, chrome, sels, matières en suspension et matière organique. Les résidus solides, séparés ou non des effluents liquides, se composent principalement de matière organique.

Le réseau d'égouts de la ville est fonctionnel et achemine, depuis le début de l'année 2000, les eaux usées vers une station d'épuration biologique. La station, terminée en 2000, fonctionnerait par intermittence, même si les autorités se refusent à tout commentaire concernant l'efficacité de traitement de l'usine. Aucune analyse des eaux en aval de la station n'a été rendue publique. Lors de la construction de la station, les autorités ont averti qu'aucun effluent des tanneries ne serait accepté à partir de juin 2000 s'ils ne remplissaient pas les conditions de qualité et de charge du règlement d'utilisation du réseau d'égout de León (Presidencia municipal de León, Guanajuato, 1998). Le règlement stipule des normes de rejet similaires aux normes

canadiennes. Le tableau 2.1 montre les normes de rejet du règlement de février 1998.

Tableau 2.1 : Normes de rejet du règlement sur l'utilisation du réseau d'égout de la ville de León, Guanajuato (d'après Presidencia Municipal de León, 1998)

Paramètres	Concentration maximale permise (moyenne quotidienne)
PH	6 à 10
Solides sédimentables (ml/L)	10
Matières en suspension (mg/L)	350
Gras et huiles (mg/L)	100
S.A.A.M (mg/L)	15
Conductivité électrique (microohms/cm)	5000
Demande biochimique en oxygène (5 jours) (mgO ₂ /L)	350
Phosphore total (mg/L)	21
Azote total (mg/L)	42
Chlorures (mg/L)	70
Arsenic (mg/L)	0.7
Cadmium (mg/L)	0.7
Cyanure (mg/L)	1.5
Cuivre (mg/L)	1.5
Chrome hexavalent (mg/L)	0.5
Mercure (mg/L)	0.015
Nickel (mg/L)	6
Plomb (mg/L)	1.5
Zinc (mg/L)	9
Sulfures (mg/L)	1
Paramètres	Charge maximale quotidienne
Demande biochimique en oxygène (5 jours)	3 kgO ₂ /jour
Matières en suspension	3 kg/jour

En date de novembre 2002, aucune tannerie ne dispose d'un système de traitement de ses effluents dans le but d'appliquer ce règlement.

Les eaux usées produites à la tannerie sont décantées avant leur rejet à l'égout. Les boues recueillies dans le bassin de décantation sont retirées deux fois l'an et étendues au parc de boues, une décharge à ciel ouvert propriété de la chambre de

l'industrie du cuir, où sont étendues les boues de toutes les tanneries membres. Ce parc ne contient pas d'infrastructure de récupération de lixiviat, ni de traitement de ces boues. En août 2002, la ville de León a annoncé son désir de fermer le parc et de déménager le dépôt des boues vers un parc plus moderne à l'extérieur de la ville. Aucun fonds public n'y était cependant alloué et la protestation des tanneurs a permis une entente avec la ville pour garder le statut quo pour une période indéterminée.

L'impact majeur sur l'environnement rapporté par la très grande majorité des intervenants, tant industriels que gouvernementaux, est la quantité de sels dans les effluents. Une grande quantité de sel (NaCl) est nécessaire pour la conservation des peaux jusqu'aux tanneries situées souvent à plus de 800 km des abattoirs. La majorité des peaux proviennent des états du nord du Mexique et des États-Unis. Ce sel s'accumule depuis des décennies dans les aquifères locaux, ce qui est devenu catastrophique dans une région semi-aride où l'accès à l'eau conditionne tant la vie économique que sociale.

2.1.3 Situation politique

Une certaine proportion des tanneries des León s'est regroupée dans une chambre d'industrie du cuir, la CICUR. Son rôle consiste à aider les tanneries à se développer, à s'informer sur les dernières technologies, à agrandir leurs marchés, etc. Les principales préoccupations d'avenir de la chambre portent sur le sort des micros et petites tanneries. Tous semblent s'entendre sur le fait que ces dernières sont vouées à disparaître. Elles sont dans l'impossibilité pour elles de relever le défi de leur développement économique devant une pression réglementaire environnementale croissante qu'elles auraient sous évaluée. La situation est aggravée par leur entêtement à ne pas vouloir se regrouper. La disparition d'une partie des tanneries, dans une ville où près de 8000 emplois sont directement reliés à l'industrie du cuir et de la chaussure, aurait de graves conséquences économiques.

La réglementation environnementale au Mexique existe, mais les différents paliers de gouvernements ont, jusqu'à maintenant, très peu de moyens de les appliquer. Les effluents industriels des tanneries sont sous les triples compétences fédérale, étatique et municipale. Leur contenu en matières toxiques les placent sous juridiction fédérale; l'eau est patrimoine national et donc de compétence fédérale à travers la Commission Nationale de l'Eau (CNA) et ce qui concerne l'utilisation des drainages, des égouts et des canalisations urbaines est du domaine municipal. Le reste des résidus non toxiques contenus dans les effluents doivent faire l'objet d'une reddition de compte à l'État.

Dans l'État de Guanajuato, les budgets sont partagés entre la PROPEAG (Ministère étatique de protection de l'environnement) et les bureaux de l'Institut national d'écologie. La PROPAEG a pour mandat de vérifier que les normes environnementales en vigueur, du moins celles de compétence étatique, soient respectées et, dans le cas échéant, prendre des sanctions. Or, celle-ci n'emploie que six inspecteurs dans tout l'état. Quant à l'Institut, sa jeune existence (5 ans) ne lui a pas encore donné la crédibilité nécessaire face aux entreprises qu'elle doit contrôler. Plusieurs cas de menaces et corruption ont été relevés par les médias dans ces deux organismes au cours des dernières années.

Une autre difficulté d'application réglementaire concerne l'extrême manque d'harmonisation des lois, normes et règlements, surtout lorsqu'ils sont appliqués parallèlement aux mêmes normes de niveaux fédéral et municipal. Plusieurs normes seraient contradictoires, ce qui donné lieu à plusieurs procès interminables qui ont débouché sur des compromis plus ou moins satisfaisants pour les deux partis.

Le dernier aspect est de caractère socioculturel. En 1986, les autorités politiques et les représentants des tanneries de León ont signé un accord cadre dans lequel ces derniers s'engagent à rencontrer les normes dans les quatre années

suivantes. Après cette période, et étant donné que rien n'avait été entrepris par les tanneurs, ils ont bénéficié d'une seconde période de grâce de quatre années. Ce processus s'est répété jusqu'en 1999, où les représentants des tanneries ont préféré tout simplement quitter la table de négociation en rapportant aux médias que leurs arguments n'étaient pas pris en compte par les représentants de la ville. (El Herald, 1999)

Les normes environnementales qui régissent les effluents des tanneries sont donc déjà en place depuis plusieurs années, à l'image de celles des pays développés. Les principaux problèmes sont la complexité du trop grand nombre de normes applicables à tous les niveaux de gouvernements et le manque flagrant de moyens pour les appliquer, autant du côté des industriels que des législateurs.

2.2 Énergie solaire au Mexique

Ramirez et al. (2000) ont analysé la situation de la recherche et développement sur les énergies renouvelables se poursuivant au Mexique. Le Mexique étant un producteur de pétrole, les auteurs de l'étude qualifient de dépendance excessive la consommation de produits pétroliers dans leur pays. Selon eux, la situation crée de graves problèmes environnementaux, sociaux et économiques. La situation nécessite une utilisation plus sensée des combustibles fossiles et le développement de sources d'énergie renouvelables. Plusieurs bons exemples d'utilisation d'énergie renouvelable dans d'autres pays en voie de développement sont cités. Selon leur étude, la recherche et développement a augmenté ces dernières années, plus particulièrement dans les secteurs de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie solaire thermique. En plus d'être une source d'énergie renouvelable, les auteurs soulignent le caractère gratuit et très disponible de l'énergie solaire sur le territoire mexicain.

Matsumoto et al. (1994) ont montré qu'avec l'aide de différents programmes gouvernementaux, plusieurs systèmes de production d'énergie solaire ont été installés

avec succès au Mexique depuis les années 70. Les auteurs soulignent le grand potentiel du territoire mexicain, malgré le lent avancement de l'utilisation de ces sources d'énergie. La plupart des publications sur l'utilisation de l'énergie solaire pour la purification de l'eau proviennent du Moyen-Orient ou de l'Inde. Les données de radiations solaires rendues disponibles par le World Radiation Data Center montrent cependant que le Mexique profite avantageusement d'un grand apport de radiations solaires dû à sa situation géographique. Les dernières données disponibles pouvant servir de comparaison datent de 1977. La moyenne quotidienne de radiations globales était alors de 23286 kJ/m² en banlieue de Mexico, elle était de 19073 kJ/m² à Amman, en Jordanie et de 20080 kJ /m² à New Delhi, en Inde. Le tableau 2.2 montre les données tirées du World Radiation Data Center [WRDC].

Tableau 2.2 : Moyenne quotidienne de radiations solaires globales de 1977 (Source : WRDC)

Radiations solaires globales (kJ/m ² jour)	Mexico (Lat: 20°N) Mexique	Amman (Lat: 32° N) Jordanie	New Delhi (Lat:28°N) Inde
Janvier	19020	9990	16230
Février	22390	14020	18540
Mars	25300	17790	23560
Avril	24730	21380	23900
Mai	23650	25580	25590
Juin	24870	27740	24110
Juillet	29960	27430	23900
Août	26070	25330	21650
Septembre	26390	21280	18860
Octobre	20490	15720	16650
Novembre	18700	13080	14650
Décembre	17860	9530	13310
Moyenne	23286	19073	20080

2.3 Procédé de tannage du cuir

Le procédé exécuté par les tanneries inclut la réception des peaux en provenance de l'abattoir jusqu'à l'arrêt du processus de putréfaction dans le but d'obtenir un cuir stable physiquement et chimiquement, qui résistera aux changements de température et d'humidité. Des étapes de finition peuvent aussi s'accomplir aux tanneries comme la coloration et l'hydratation supplémentaire pour rendre le cuir plus doux et souple.

Durant le processus, les peaux sont placées dans le tambour de tannage et l'eau et les produits chimiques nécessaires au traitement sont ajoutés, le tout est brassé et les liquides sont purgés à la fin de l'étape. Chacune des étapes, ainsi que les produits ajoutés et les produits sortants sont résumés dans le tableau 2.3. Le tannage expliqué ici est le tannage au chrome, le plus utilisé pour son efficacité et son produit fini qui est souple et le plus utilisé pour la fabrication de vêtements et de chaussures. Le tannage végétal utilise des produits végétaux comme des écorces à l'étape de tannage. Le cuir final est plus rigide et il plutôt utilisé pour faire des meubles et des semelles de chaussures. La tannerie de León, où sera effectué le travail de terrain, utilise le tannage au chrome.

2.3.1 Caractérisation des effluents

Plusieurs données ont été publiées concernant la caractérisation des effluents de tanneries. La complexité des produits et procédés utilisés, ainsi que l'hétérogénéité des procédés appliqués dans les différentes tanneries des différentes régions du monde sont les causes de la variété des résultats de caractérisation publiés. Ates et al. ont publié en 1997 la caractérisation des effluents de près de 250 tanneries d'Istanbul qu'ils ont étudié pendant une année. Leur approche divisait les tanneries en trois districts géographiques et selon leur degré et type d'activités de tannage. Ces districts produisent donc des données plus homogènes pour leur projet de gestion plus environnementale des effluents. Les résultats de caractérisation des effluents

combinés bruts des tanneries des trois districts sont présentés dans le tableau 2.4. Le procédé de tannage utilisé en Turquie est très similaire au procédé utilisé au Mexique.

Tableau 2.3 : Étapes de fabrication du cuir

Entrants dans le tambour de tannage	Opération	Description	Sortants (dans la purge)
Peaux humides et salées, eau	Trempage et lavage	Hydratation et nettoyage de la peau du sel et des résidus de sang et fumier	Eau, sel, résidus, sang impurifiés
	Dégraissage	Opération mécanique pour enlever l'endoderme, donc les protéines et la graisse	Eau, graisses, solides, impurifiés
Sulfure de sodium, Hydrosulfure de sodium, chaux, dérivés de pétrole, enzymes.	Épilage et pelanage	Attaque chimique pour éliminer le poil, l'épiderme, augmenter la séparation entre les fibres de collagène de la peau et détruire les protéines et les masses non structurales comme les nerfs et vaisseaux sanguins.	Poils, résidus de peau, matière organique, S, Cl, Chaux
Eau	Lavage	Élimination des résidus de chaux et autres impurifiés	Eau, poils, résidus de peau, matière organique, S, Cl, Chaux
Eau, sulfate d'ammonium, bisulfite de sodium	Déchaulage	Élimination de la chaux et des autres produits alcalins de l'intérieur de la peau en utilisant des acides organiques et inorganiques, sels d'ammonium et bisulfite de sodium	Eau, chaux, Na, S, résidus, matières organiques
Eau, enzymes : protéases, lipases	Purge enzymatique	Élimination avec des enzymes des impurifiés et substances non-tannables, donne une meilleure flexibilité au cuir.	Eau, enzymes, impurifiés
Eau	Lavage	Pour freiner l'action des enzymes et éliminer les résidus de chaux, graisse, sels et autres impurifiés	Eau, résidus, graisse, sels
Eau, NaCl, acide sulfurique, acides organiques,	Picklage	Ajout d'acides et sels qui interrompent les réactions enzymatiques, éliminent la chaux combinée au collagène et préparation du cuir au tannage (ou entreposage)	Eau, sels, acides, S, Cl
Sulfate de chrome	Tannage	Le sel de chrome hydrolyse en Cr^{3+} pour pénétrer la peau et former des complexes bioorganiques de Cr^{3+} avec les protéines pour stabiliser le tout.	Eau, sels, S, Cr^{3+}
Bicarbonate de sodium, oxyde de magnésium, carbonate de sodium, fongicides.	Basification	Les sels alcalins augmentent le pH de la solution et facilitent la réaction du Cr^{3+} avec les liens organiques.	Eau, Cr, Cl, S, Mg, matières en suspension, pH très bas
Eau	Lavage final	Enlèvement des sels et produits chimiques non absorbés par le cuir.	Eau, Cr, Cl, S, Mg, matières en suspension, pH très bas

2.3.2 Toxicité

Yatribi et Nejmeddine (2000) ont étudié la toxicité des effluents des tanneries avec le cladocère *Daphnia pulex*. Ils ont déterminé la capacité inhibitrice des deux

rejets les plus pollués du synoptique de fabrication de cuir à savoir l'épilage-pelanage et le tannage au chrome. Leur caractérisation de ces deux effluents est donnée au tableau 2.5.

Tableau 2.4 : Caractérisation des eaux usées des tanneries d'Istanbul (d'après Ates et al. 1997)

Paramètres (mg/L)	District 1 (Tuzla)		District 2 (Çorlu)		District 3 (Biga)	
	Moyenne	Écart	Moyenne	Écart	Moyenne	Écart
DCO Totale	5094	3235-7420	4947	2513-8781	4850	3180-6270
DCO Soluble	2336	1040-3810	1770	1284-3125	2150	1320-2950
DBO ₅	1760	600-2600	-	-	-	-
STS	2229	1470-3474	2239	1000-4740	2175	1365-2975
TVSS	-	-	1131	650-1540	-	-
TKN	358	112-640	214	208-220	265	195-325
N-Organique	223	102-347	119	84-159	120	76-172
NH ₃ -N	135	48-245	95	56-136	145	65-185
Total P	-	-	8,6	3,4-22,3	72	4,2-10,5
Total Cr	115.6	58-213	168	84-236	65	45-92
S ₂ -	51	17-110	52	10-121	50	26-82
Alcalinité	1350	797-1818	665	259-1132	490	345-725
Chlorures	10300	6370-12800	7601	6150-9060	-	-
PH	8.1	6,4-9,98	8,4	6,41-10,1	8,3	7,35-9,74

Tableau 2.5 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées d'épilage-pelanage et du tannage de chrome (d'après Yatiri et Nejmeddine, 2000)

	PH	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Sulfures (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cr total (µg/L)
Épilage – pelanage	12	20 000	7 000	160	2 150	510	6 900	-
Tannage au chrome	3 – 5,6	7 020	2 400	2 600	85	890	0,61	70 000

Les effluents du procédé d'épilage-pelanage sont caractérisés par une grande teneur en matière organique ainsi qu'en sulfures. L'effluent de tannage au chrome contient quant à lui une forte concentration de chrome. Les auteurs qualifient de très toxiques les deux rejets lorsque non-traités. Ils ont aussi conclu que l'élimination de la matière organique, des matières en suspension, du chrome et des sulfures par un prétraitement a diminué la toxicité des deux effluents en les faisant passer d'un rejet très toxique à un rejet peu toxique.

2.4 Les traitements des effluents de tanneries

Les technologies suggérées pour traiter les effluents des tanneries à travers le monde sont une combinaison de traitements physico-chimique et biologique. Les plus gros solides sont enlevés par filtration, le chrome est enlevé par précipitation, les sulfures par oxydation des sulfides. L'enlèvement des graisses, de l'azote et de la matière organique s'effectue dans un système biologique, de type boues activées. Ce type d'infrastructures est utilisé à travers le monde, mais plus précisément dans les tanneries de grandes tailles à cause des importants investissements de départ en plus des coûts d'entretien et la nécessité d'une main d'œuvre spécialisée sur place en tout temps.

La plus grande partie de la production de cuir mondiale provient de pays en développement où les normes de rejet ne sont pas appliquées ou bien non existantes. Ces infrastructures de traitement complexes sont situées en Amérique du Nord et en Europe, mais aussi dans quelques pays du Moyen-Orient et en Inde. Les tanneries mexicaines ont très rarement des systèmes de traitement. (Instituto Nacional de Ecologia, 1999)

2.5 L'évaporation pour le traitement des eaux usées

Plusieurs types d'industries produisent des eaux usées. Les eaux usées pourraient être définies comme une solution de composants chimiques dissous ou en suspension dans de l'eau. En milieu industriel comme municipal, plusieurs types de traitements chimiques, physiques ou biologiques sont habituellement utilisés à la suite pour traiter chaque famille de contaminants de façon distincte. Ce processus à plusieurs étapes nécessite des installations complexes et coûteuses.

L'évaporation permet de séparer l'eau des matières dissoutes en une seule étape. La distillation permet de récupérer l'eau évaporée en la condensant pour réutilisation, tout en concentrant et déshydratant les polluants. Plusieurs auteurs

recommandent l'évaporation comme prétraitement des effluents industriels. Edwards (1995) recommande l'évaporation comme traitement des eaux usées contaminées à l'huile et aux métaux. Dans le cas de prétraitement de rejets industriels, des bouilloires industrielles carburant à l'électricité et au gaz sont habituellement utilisées.

Selon la composition des eaux usées, Leonhard et al. (1994) recommandent entre autre la distillation, précédée d'un prétraitement. La revaporisation est un procédé qui sépare d'abord les substances facilement volatiles en vaporisant l'eau usée dans un jet d'air ou de vapeurs d'eau. Les substances facilement volatiles s'évaporent et peuvent être récupérées en les condensant par la suite. Les auteurs recommandent ce prétraitement pour les eaux usées qui contiennent des substances ayant un faible coefficient de Henry, comme l'ammoniac ou d'autres substances facilement volatiles. Les auteurs recommandent ensuite l'évaporation (avec récupération de l'eau) comme méthode efficace qui enlève totalement les composés inorganiques en une étape et réduit les composés organiques à de faibles concentrations résiduelles. Ils ont noté que des acides pouvaient être retrouvés dans le distillat, mais un ajustement du pH avant l'évaporation réduisait presque totalement la concentration d'acide dans le distillat. Leurs expériences ont démontré que les effluents et eaux de procédé peuvent être traitées à un niveau très efficace qui n'est généralement pas possible avec les méthodes conventionnelles. Les produits finaux sont concentrés, facilement manipulables et peuvent être réutilisés.

2.5.1 Boues de stations d'épuration

L'équipe d'Haralambopoulos (2002) a étudié le processus de déshydratation par distillateur solaire d'une boue de station d'épuration municipale par boues activées. Les cinq litres de boue placés dans le distillateur ont perdu toute leur eau à la fin des cinq jours qu'a duré l'expérience. Néanmoins, le distillat contenait une contamination croissante de composés organiques volatils contenus dans la boue qui se sont évaporés avec l'eau. Les boues de station d'épuration contiennent une

concentration d'eau plus faible que les eaux usées. Malgré la forte concentration de contaminants, le distillateur solaire a pu distiller l'eau présente dans la boue. Ces travaux permettent donc d'espérer un rendement intéressant avec des eaux usées moins chargées comme les effluents de tannerie.

2.5.2 Pâtes et papier

McKeough et Fagernäs (1999) ont utilisé des évaporateurs pour concentrer les eaux de procédé d'usines de pâtes et papiers. Les eaux de procédé des pâtes et papier sont caractérisées par une grande concentration de matières organique, des acides (surtout acétique et aussi propionique), et des traces d'alcool (méthanol et éthanol). Ils ont évaporé les filtrats de différentes eaux de procédé jusqu'à de hautes concentrations matières solides. La viscosité des effluents concentrés était le facteur limitant pour l'obtention d'une plus grande concentration de matières solides. Pour un effluent brut de 1% (poids/poids) de matières solides, ils ont atteint 45% pour l'effluent le plus visqueux et 60% pour le moins visqueux par évaporation. Le distillat contenait des faibles quantités de matières organiques. Des acides organiques, en particulier de l'acide acétique et des alcools étaient les principaux composants détectés.

2.5.3 Comparaison d'effluents industriels

Jhorar et Malik (1993) ont observé l'évaporation naturelle de différents effluents organiques d'industries indiennes à partir de surfaces ouvertes. Ils ont laissé évaporer le contenu des béchers en les plaçant dans un four à 60° et à l'extérieur à l'air libre (mais sans radiations solaires directes) pour 30 jours. Les effluents d'usine de pâtes et papier, de raffinerie de pétrole et les eaux d'égout domestiques se sont évaporés de façon similaire à de l'eau. Les effluents de la distillerie de mélasse avaient un taux d'évaporation légèrement plus faible que les autres effluents. C'est que celui-ci présentait un film visqueux en surface qui, selon les auteurs, réduisait le taux d'évaporation. Les auteurs ont pu diminuer cette résistance à l'évaporation par un

mélange mécanique régulier. Ils ont aussi établi un lien entre un brassage plus fréquent et un plus haut taux d'évaporation. Tout comme McKeough et Fagernäs (1999), Jhorar et Malik (1993) ont noté que l'effluent dont le taux d'évaporation était limité était significativement plus visqueux que les autres effluents.

2.5.4 Facteurs limitatifs

Les auteurs revus dans cette section démontrent l'efficacité de l'évaporation comme traitement des eaux usées industrielles. L'évaporation permet de séparer l'eau et de concentrer les polluants de façon très efficace. Cependant, les auteurs ont mentionné certains facteurs qui limitent l'efficacité de l'évaporation comme traitement de séparation de l'eau. Les composés organiques volatils et des acides contenus dans l'eau brute évaporée se retrouveront en grande partie dans le distillat si celui-ci est condensé. Dans le cas d'évaporation seulement, ces composés évaporés produiront une pollution atmosphérique. Leonhard et al. (1994) recommandent la revaporisation comme prétraitement à l'évaporation pour d'abord séparer les composés organiques volatils. Pour éviter l'évaporation d'acides, Leonhard et al. (1994) et McKeough et Fagernäs (1999) recommandent d'ajuster le pH de la solution avant l'évaporation. La viscosité de la solution brute a été citée comme facteur limitatif par McKeough et Fagernäs (1999) et Jhorar et Malik (1993). Les composés visqueux auraient tendance à former un film qui réduirait le taux d'évaporation. D'après les auteurs, ce taux pourrait être augmenté par une diminution de la viscosité, ou un brassage mécanique régulier dans le cas d'un film statique en surface.

Les effluents des différents procédés de tannage ne contiennent pas de composés organiques volatils qui pourraient se retrouver dans le distillat. Les effluents des étapes de tannage sont par contre très acides et un ajustement du pH pourrait être nécessaire pour obtenir une bonne qualité de distillat. Enfin, la plupart des effluents ont une forte concentration d'huile et graisse, ce qui augmentent la viscosité de la solution. Un enlèvement d'une partie de ces graisses, un brassage mécanique ou une

dilution pourrait atténuer ce dernier problème.

2.6 Distillation solaire

Les distillateurs solaires simples sont utilisés aujourd'hui pour la production d'eau potable à partir d'eau salée dans plusieurs pays du tiers-monde. Malik et al. (1982) maintiennent que la distillation solaire est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités. Selon Malik et al. (1982), les alchimistes arabes auraient été les premiers à utiliser la distillation solaire. Les premiers travaux détaillés publiés sur le sujet remontent à Harding (1883) où il présente le distillateur en bois recouvert de verre que l'ingénieur suédois Carlos Wilson utilisait au Chili. Cet appareil pouvait produire en moyenne 4.9 kg d'eau distillée par jour pour une journée d'été.

2.6.1 Principes de base des distillateurs solaires

Un distillateur solaire conventionnel est un bassin étanche à l'air, habituellement fait de feuille de fer galvanisé en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériel transparent et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire. L'eau usée ou salée est versée dans le bassin de métal et est exposée aux rayons du soleil. Le couvercle transparent laisse pénétrer les radiations solaires qui sont absorbées en grande partie par le fond noir. Conséquemment, l'eau se réchauffe et l'humidité comprise entre l'eau et le couvercle augmente. La base irradie aussi des rayons infra-rouges qui sont reflétés dans l'eau par le couvercle transparent; le verre (ou plastique) n'est pas transparent pour les radiations de longues longueurs d'ondes. Le couvercle transparent garde donc l'énergie solaire à l'intérieur; il réduit aussi les pertes de chaleur par convection. Le couvercle est habituellement à un certain angle de l'horizontal pour faciliter l'écoulement de l'eau condensée le long de la paroi jusqu'à un collecteur d'eau distillée.

Löf et al. (1961) ont été les premiers à définir les principaux mécanismes d'échange d'énergie dans un distillateur solaire simple tel que présentés dans la figure 2.1.

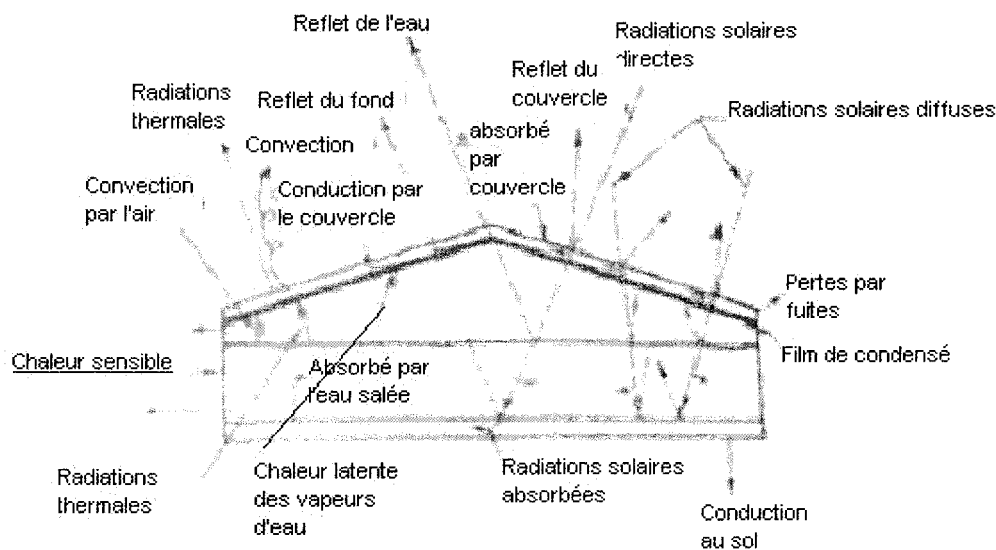


Figure 2.1 : Diagramme de transfert d'énergie dans un distillateur solaire de type bassin (d'après Löf, 1961)

Une grande partie des radiations solaires, directes et diffuses, est absorbée par le fond noir. De petites quantités d'énergie sont perdues par réflexion à la surface du verre et à la surface de l'eau. L'énergie absorbée par la base est presque totalement transférée à l'eau et seulement une petite fraction est perdue au sol par conduction via la structure de soutien. L'énergie qui est transférée de l'eau au couvercle de verre l'est essentiellement par la vapeur d'eau qui s'évapore de la surface de l'eau et qui perd sa chaleur de vaporisation en se condensant. De la chaleur est aussi transférée de l'eau au couvercle par convection libre de l'air pris sous le couvercle. Le verre du couvercle absorbe une partie de la chaleur émise par la surface de l'eau. Le couvercle absorbe aussi une petite partie des rayons solaires incidents. Cette chaleur absorbée par le couvercle est perdue à l'atmosphère par convection et radiation.

Il est donc possible de diviser les énergies entrantes et sortantes du système (Dunkle, 1961) :

- Entrants :
1. Radiations solaires
 2. Radiations atmosphériques
- Sortants :
1. Convection à l'atmosphère
 2. Radiation à l'atmosphère
 3. Réflexion à l'atmosphère
 4. Conduction au sol
 5. Conduction et convection aux côtés
 6. Fuites de vapeur
 7. Fuites d'eau usée du bassin
 8. Chaleur sensible du condensé et du trop-plein d'eau usée.

Bloemer et al. (1961) ont calculé les pertes d'énergie dans un distillateur solaire. Leurs résultats sont présentés dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Pertes d'énergie dans un distillateur de type bassin (Bloemer et al. 1961)

	Pourcentage des radiations solaires
1. Évaporation du distillat (efficacité)	31
2. Pertes d'énergie au sol et aux côtés	2
3. Radiations solaires reflétées du couvercle	11
4. Radiations solaires absorbées par le couvercle	5
5. Radiations du bassin d'eau au couvercle	26
6. Convection interne	8
7. Re-évaporation du distillat et pertes non-comptées	17
	100

2.6.2 Résultats types obtenus avec les distillateurs à bassin simple.

Plusieurs auteurs ont publié leurs résultats de taux de distillation obtenus avec leurs différents distillateurs et les conditions environnementales respectives. Malik et al (1982), dans leur ouvrage bibliographique, mentionnent une productivité type de $2.4 \text{ kg/m}^2\text{-jour}$ pour New Delhi, Inde. La productivité d'un distillateur pour une région doit être considérée en fonction des radiations solaires reçues dans la région. Les radiations solaires pour les trois grandes régions de recherche en distillation solaire

sont résumés dans le tableau 2.2 de ce chapitre pour une meilleure comparaison des différents résultats publiés. Dans son livre, Tiwari (2002) développe en détails le calcul de l'efficacité thermique du distillateur conventionnel. Il affirme que le taux de distillation obtenu avec un distillateur conventionnel dépend de la différence entre la température de l'eau et la température de la vitre, pour une plus grande efficacité d'évaporation et de condensation.

Akash et al. (2000) ont présenté les résultats détaillés de leurs expériences conduites sur un distillateur simple à couvercle à angle au nord et au sud, situé à Amman, Jordanie. Ils ont testé différents angles de couvercle et différents niveaux d'eau. Leurs meilleurs résultats ont été obtenus avec un angle de couvercle de 35° et un plus faible volume d'eau dans le bassin. À ces conditions, ils ont pu obtenir une production de 6.5 litres par jour, pour un appareil de 3 m^2 ($1\text{m} \times 3\text{m}$), donc une production de $2.17 \text{ litres/m}^2\text{-jour}$. La température maximale de l'eau du bassin a été de 65°C vers 14h00. La ville de Amman, Jordanie est située à une latitude de 32° N et reçoit $19\,073 \text{ kJ/m}^2\text{jour}$ en radiations solaires globales moyennes. (WRDC)

Sharma et Mullick (1993) ont développé une méthode pour calculer la production horaire d'eau distillée pour un distillateur simple. Ils affirment que la production moyenne peut atteindre $4 \text{ litres/ m}^2\text{-jour}$ en période optimale de radiations solaires à leur station de New Delhi. Cette ville est située à une latitude de 28°N et reçoit en moyenne $20\,080 \text{ kJ /m}^2\text{jour}$ de radiations solaires (WRDC). En comparaison, la région mexicaine où se sont déroulés les essais de la présente expérience se situe à une latitude de 20° Nord et reçoit des radiations solaires de $23\,286 \text{ kJ/m}^2\text{jour}$ en moyenne, donc de plus fortes radiations solaires que les régions où les résultats ont été publiés, ce qui supporte la pertinence d'un essai de cette technologie au Mexique. (Voir tableau 2.2, WRDC)

2.6.3 Théorie de l'évaporation

Dans les distillateurs solaires, les vapeurs sont produites par un processus d'évaporation, qui est différent de l'ébullition. L'évaporation est un phénomène de surface, contrairement à l'ébullition qui se produit dans tout le liquide. À une température et pression sous le point d'ébullition, la pression de vapeur est faible et la pression à l'intérieur du liquide est égale à la pression atmosphérique plus la pression du liquide. Des bulles de vapeur d'eau ne peuvent donc pas se former. Par contre, au point d'ébullition, la pression de vapeur saturée est égale à la pression atmosphérique, des bulles se forment, et la vaporisation se produit alors dans tout le volume du liquide. Les facteurs contribuant à optimiser l'évaporation des particules d'eau sont donc différents des facteurs reliés à l'ébullition.

Le phénomène d'évaporation de l'eau s'explique par des molécules situées en surface qui possèdent assez d'énergie cinétique pour s'échapper du liquide. L'énergie nécessaire pour surpasser les forces d'attraction du liquide et s'évaporer s'appelle la chaleur latente d'évaporation et résulte en une baisse de la température de l'eau. Si le phénomène se produit dans un environnement fermé, l'évaporation se produira jusqu'au point de saturation de vapeur, un équilibre entre l'évaporation des molécules et la condensation des vapeurs. La pression de saturation de vapeur dépend de la température de l'eau. (Sears et Salinger, 1986)

Les figures 2.2 et 2.3 montrent la relation entre les pressions de saturation de vapeur et la température de l'eau. Tiwari (2002) a déduit une relation empirique suite à ses résultats expérimentaux. Elle est présentée à la figure 2.3. Comme l'énergie cinétique des molécules est plus grande à des températures plus hautes, plus de molécules s'échappent de la surface et la pression de saturation de vapeurs correspondante est plus élevée. La température à laquelle la pression de vapeur est égale à la pression atmosphérique est le point d'ébullition.

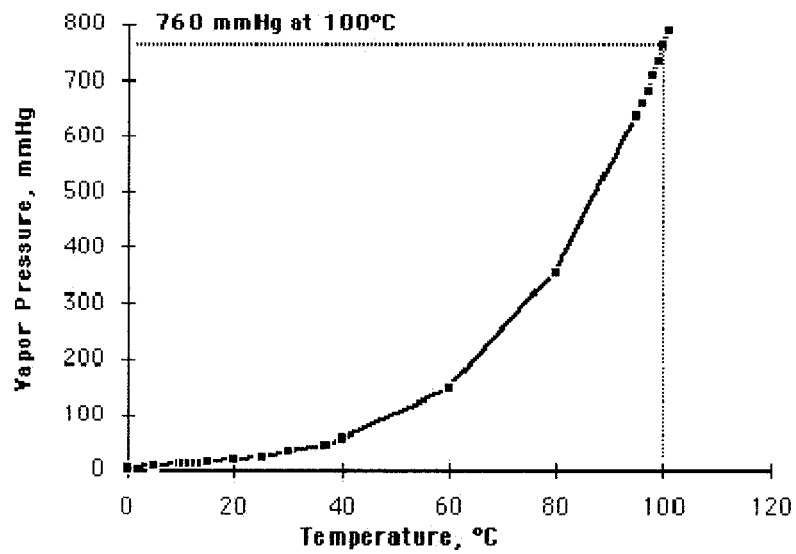


Figure 2.2 :Pression de saturation de vapeur en fonction de la température.(Sears et Salinger, 1986)

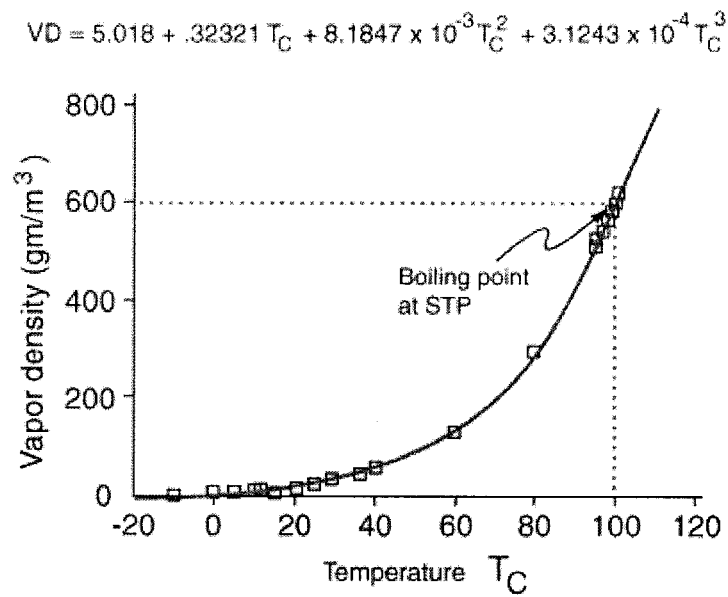


Figure 2.3 :Densité de vapeur au point de saturation en fonction de la température, à pression atmosphérique constante et la relation empirique déduite (Tiwari,2002)

2.6.4 Facteurs affectant l'évaporation de surface

Sartori (1996) a comparé les comportements thermiques des distillateurs solaires traditionnels (appareil fermé avec couvercle transparent) aux évaporateurs ouverts (de type bassin ouvert). Il a trouvé que même si la température était beaucoup plus haute dans les distillateurs solaires, la capacité d'évaporation était plus importante dans les évaporateurs ouverts. (Figure 2.4)

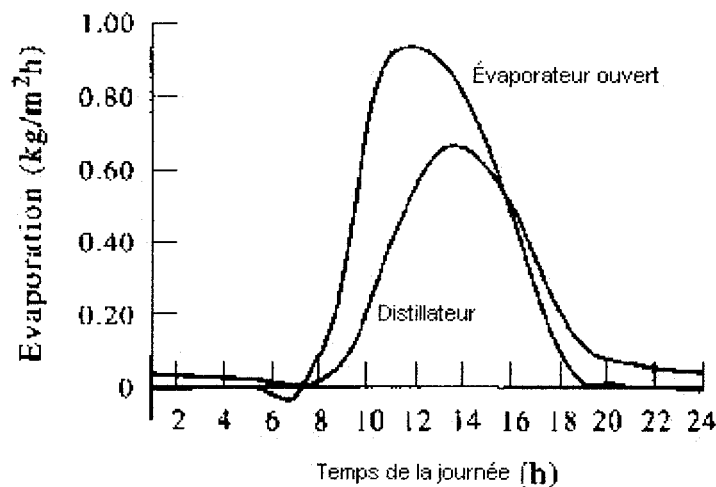


Figure 2.4 : Taux d'évaporation du distillateur et de l'évaporateur solaire sous les mêmes conditions. (Sartori, 1996)

Sartori (1996) a analysé les différents facteurs affectant l'évaporation de l'eau d'une surface libre : la différence de température entre l'eau et l'air ambiant, l'humidité relative de l'air ambiant et la vitesse du vent à la surface de l'eau. L'impact de ces facteurs sur le taux d'évaporation est présenté à la figure 2.5 qui suit. Selon les résultats de Sartori (1996), une plus grande différence entre la température de l'eau et la température de l'air ambiant optimise l'évaporation, de même que la haute vitesse du vent et qu'une faible humidité relative.

Dans sa publication, Ali (1991) affirme aussi qu'un mouvement d'air à l'intérieur de son distillateur a permis d'augmenter l'évaporation, et par le fait même, la production d'eau distillée. Lors de ses travaux, Ali (1991) a forcé un mouvement

d'air à l'intérieur du distillateur par un ventilateur.

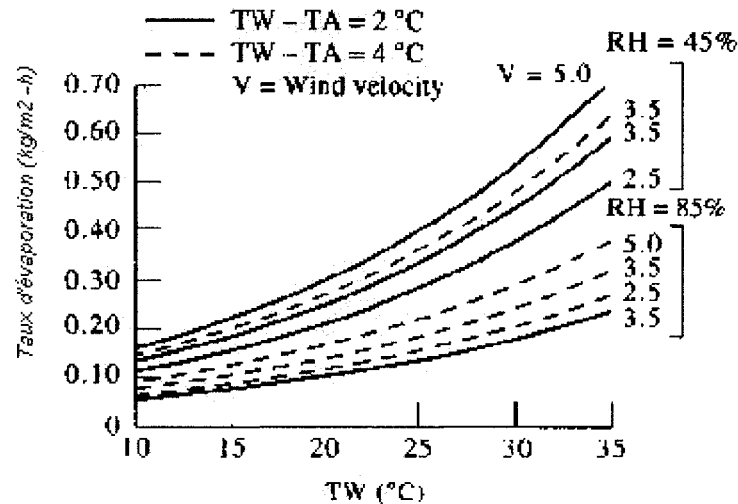


Figure 2.5 : Facteurs affectant l'évaporation de l'eau d'une surface libre : TW=Temp de l'eau, TA=Temp de l'air ambiant, V= vitesse du vent, RH= humidité relative.(Sartori,1996).

La profondeur de l'eau influencerait aussi l'évaporation dans les distillateurs. Suneja et Tiwari (1999) ont trouvé que l'évaporation diminuait avec une augmentation de la profondeur de l'eau. Ils expliquent ce phénomène par une plus grande quantité d'énergie nécessaire pour chauffer une plus grande quantité d'eau à une température nécessaire à l'évaporation des molécules de surface, car c'est le fond du bassin qui absorbe et transmet la chaleur par convection aux molécules de surface où s'effectue l'évaporation.

Un dernier facteur aurait été mentionné par plus d'un auteur comme affectant l'évaporation de surface : l'aire de la surface d'évaporation. Kwatra (1996) a augmenté la surface disponible à l'évaporation, tout en maintenant le même volume d'eau et la même quantité de radiations solaires. Ses résultats ont démontré une légère hausse de l'évaporation. Il explique ces résultats par la plus grande quantité de molécules situées en surface de l'eau, donc qui sont aptes à s'évaporer.

2.6.5 Facteurs affectant la condensation

La basse température de la vitre, ou plutôt la plus grande différence possible entre la température des vapeurs et celle de la vitre, serait le principal facteur affectant le taux de condensation, selon la plupart des auteurs.

Les résultats de Sartori (1996) montrent l'effet de cette différence de température sur le taux de distillation à la figure 2.6.

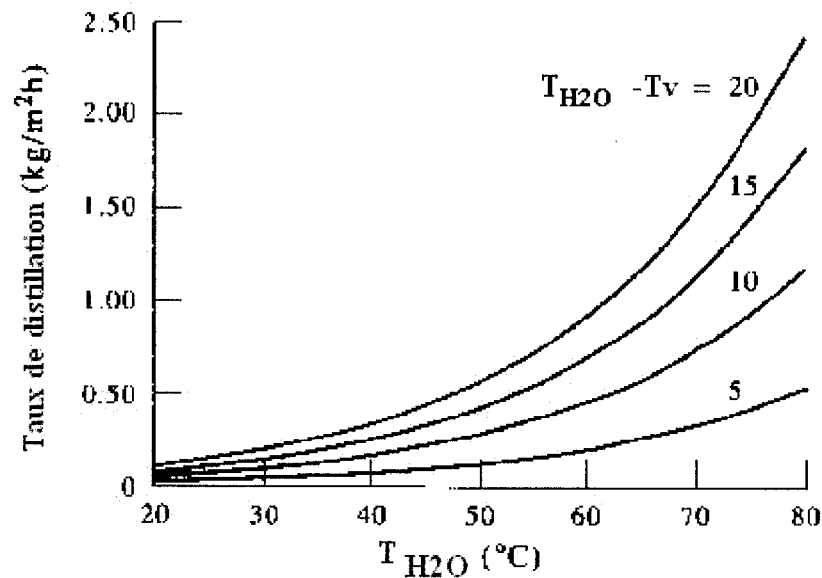


Figure 2.6 : Taux de distillation selon la différence entre la température de l'eau et la température de la vitre. (Sartori, 1996)

Suneja et Tiwari (1999) ont abaissé la température de la vitre à l'aide d'un faible débit d'eau fraîche sur l'extérieur de la vitre. Ils ont démontré que ce jet a augmenté le taux de condensation sur la vitre et la production d'eau distillée. La vitesse du vent sur la vitre aurait aussi l'effet d'augmenter la condensation en abaissant la température de la vitre. Tel que conclu par Cooper (1969), la quantité d'eau distillée augmente de 11.5 % pour une augmentation du vent de 0 à 2.15 m/s.

2.6.6 *Modifications pour amélioration de l'évaporation*

Les facteurs affectant l'évaporation étant connus, plusieurs chercheurs ont apporté des modifications au design de leurs distillateurs pour améliorer la capacité d'évaporation de leur appareil.

Valsaraj (2002) a voulu absorber et transmettre l'énergie solaire directement aux molécules d'eau situées à la surface. Il a fait ses essais de distillation avec une feuille d'aluminium noir perforée et pliée, placée à la surface de l'eau. Valsaraj (2002) a vu l'évaporation augmenter en moyenne de 50% avec l'ajout de cette feuille métallique en surface.

Selon plusieurs, le facteur affectant le plus l'évaporation reste la température de l'eau pour augmenter la pression de vapeur saturée de l'air ambiant. Pour ce faire, plusieurs auteurs ont cherché à concentrer une plus grande quantité d'énergie sur le réservoir d'eau. De Paul (2002) a ajouté un élément chauffant électrique sous le bassin. Suneja et Tiwari (1997) ont construit et évalué un distillateur à absorbeur inversé, qui se compose d'un concentrateur parabolique sous l'appareil pour concentrer l'énergie solaire sur la base du bassin d'eau, en plus de recevoir l'énergie directe sur le dessus de l'appareil. Kothdiwala et al. (1996) ont modélisé la performance optique d'un appareil similaire dans le but d'optimiser les différents paramètres et ont aussi trouvé une efficacité globale augmentée.

Minasian et al. (1997) ont utilisé un réflecteur cylindrique pour concentrer les radiations solaires sur la surface extérieure d'un canal noir situé au point focal. Ils ont trouvé une amélioration de la production d'eau distillée de 25 à 35% sur un distillateur conventionnel à bassin de même dimensions que le réflecteur.

Des collecteurs paraboliques sont souvent utilisés en série avec des distillateurs pour préchauffer l'eau (Garcia-Rodriguez et Gomez-Camacho, 1999a).

Des concentrateurs similaires sont aussi utilisés pour produire de la vapeur (Kalogirou et al., 1997, Garcia-Rodriguez et al., 1999b) ou de l'électricité comme à la centrale d'électricité solaire de Kramer Junction, Californie (figures 2.7 et 2.8). Blanco et al. (1999) utilisent des concentrateurs solaires cylindriques pour la détoxification solaire d'eau contenant des contaminants chlorés non-biodégradables persistants.

Le design et l'installation des concentrateurs adaptés à chaque système a fait l'objet de plusieurs publications (Duffie et Beckman 1991, Eames et al. 1996, ISES 2001, Tiwari 2002). Un chapitre complet du dernier livre de l'ISES (2001) est dédié aux concentrateurs solaires. Gordon y définit plusieurs avantages à utiliser des concentrateurs solaires : ils concentrent l'énergie d'une plus grande surface sur une plus petite ; les pertes de chaleur seraient réduites en plus d'une plus petite masse thermique ; la température est plus haute là où nécessaire ; les coûts d'entretien sont réduits par des réflecteurs-concentrateurs moins chers qu'un absorbeur grande surface.

Quant au type de concentrateur, Richter (1996) affirme entre autre que la résistance et l'efficacité d'un grand concentrateur cylindrique fixe a souvent plus d'avantages que de petits réflecteurs cylindriques suivant le soleil.

2.6.7 Modifications pour amélioration de la condensation

Lors d'une condensation simple sur la vitre, les expériences de Kumar et al. (2000) ont démontré qu'un angle de 15° optimiserait la condensation et la production d'eau distillée tandis que Akash et al. (2000), mentionnés plus tôt, ont obtenu de meilleurs résultats avec un angle de 35° . Cooper (1969) maintient qu'un vent moyen contribue à rafraîchir la vitre pour obtenir une bonne condensation. Tel que mentionné précédemment, des auteurs ont aussi cherché à refroidir la vitre où a lieu la condensation dans les distillateurs simples (Suneja et Tiwari, (1999)).

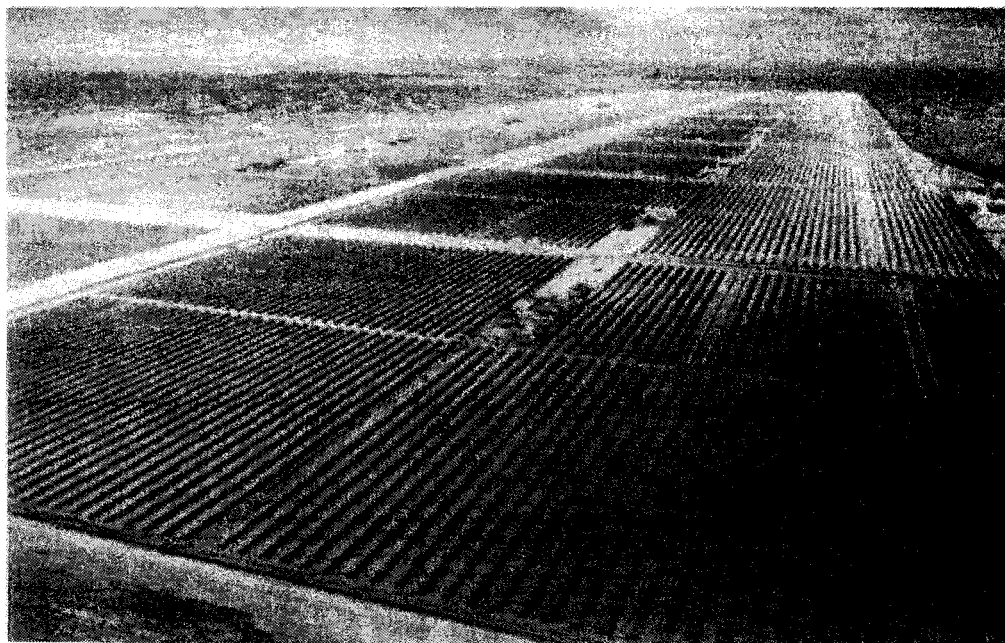


Figure 2.7 : Champ de concentrateurs de la centrale d'électricité solaire de Kramer Junction, Californie, USA. (Source : ISES 2001)

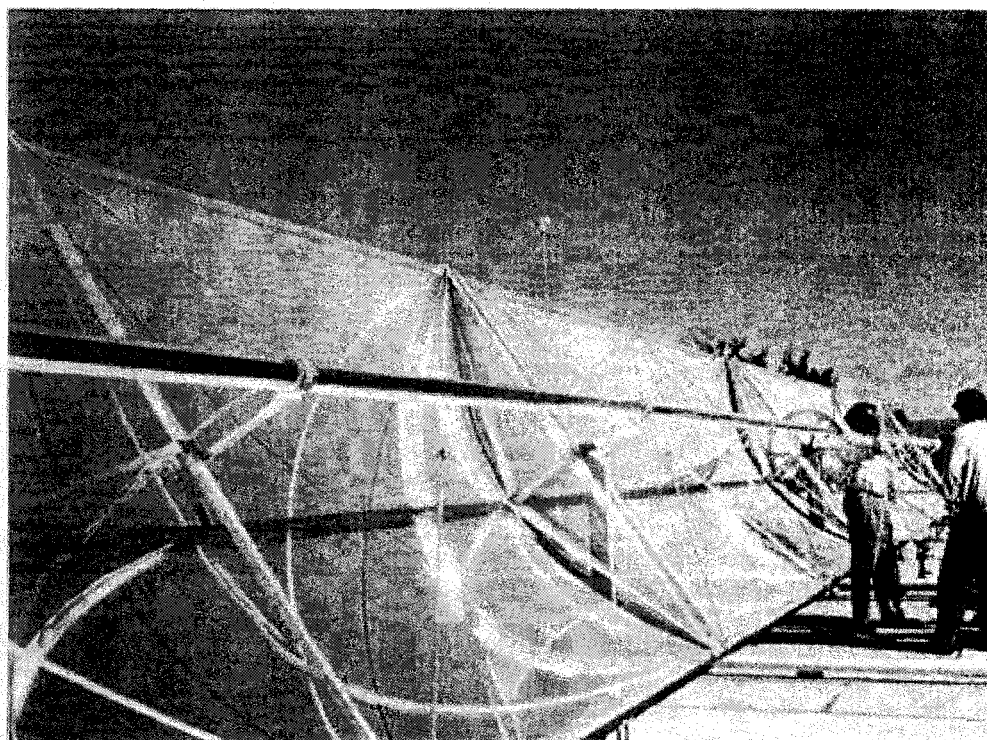


Figure 2.8 : Détails des concentrateurs de la centrale d'électricité solaire de Kramer Junction, Californie, USA. (Source : ISES 2001)

Fath et Hosny (2002) ont gardé un des côtés du couvercle du distillateur parallèle aux rayons du soleil, donc dans l'ombre pour créer en le site de condensation accrue. L'ajout de ce condensateur interne a augmenté la productivité de 55%. El-Bahi et Inan (1999) ont aussi modifié une partie de leur distillateur pour couper l'entrée aux radiations solaires et favoriser la condensation sur le deuxième couvercle. Ils auraient atteint une productivité de 7 litres/ m²-jour, ce qui représenterait 70% de plus qu'en absence du condensateur. Pour un refroidissement plus efficace des vapeurs d'eau, plusieurs auteurs ont ajouté à leurs distillateurs des éléments refroidissants, ou échangeurs de chaleur. Khalifa et al. (1999) ont ajouté un échangeur de chaleur à l'intérieur du distillateur en y faisant circuler de l'eau froide dans des tuyaux métalliques. Leur production d'eau distillée aurait augmenté de 57% avec le condensateur interne. Badran (2001) a aussi ajouté un échangeur de chaleur qui en plus préchauffait l'eau usée avant la distillation. Il a obtenu une amélioration de la production de 12%, ce qu'il attribue en grande partie à la hausse de la condensation.

Des auteurs ont aussi tenté d'augmenter le taux de condensation en sortant les vapeurs du distillateur vers un condensateur-échangeur de chaleur externe. Abu-Qudais et al. (1996) ont construit un échangeur de chaleur et l'ont relié au distillateur simple par un système de circulation propulsé par un ventilateur électrique. Ils ont obtenu une production d'eau distillée de plus de 40% de plus que le distillateur simple seul. Farid et Al-Hajaj (1996) ont aussi construit un système de distillation d'eau salée incluant un échangeur de chaleur pour la condensation des vapeurs produites par le collecteur-évaporateur. Leur production quotidienne d'eau distillée a atteint 12 litres/m²-jour.

2.7 Évaporation solaire sur des eaux de tanneries

Des évaporateurs solaires sont déjà utilisés dans les tanneries indiennes pour concentrer le sel des effluents des procédés de trempage et picklage. Les effluents de

ces deux procédés y sont séparés de tous les autres (en plus de la liqueur de chrome du procédé de tannage qui est aussi séparée) dans le but d'obtenir un meilleur traitement biologique secondaire des autres effluents. La ségrégation des effluents de trempage apporte une réduction des matières totales dissoutes d'environ 30% à l'effluent final. Cependant, le sel récupéré n'est pas réutilisé en raison des saletés et bactéries qu'il contient. De plus, l'utilisation de sel frais est économique pour les tanneurs.

Srinivasa Kannan et Rao (2000) ont étudié les paramètres théoriques du taux d'évaporation d'eau usée de tannerie avec ces évaporateurs simples. Ils ont utilisé de l'eau de trempage filtrée et diluée à différentes concentrations pour réaliser des évaporations en changeant les paramètres suivants : température atmosphérique, vitesse du vent, humidité atmosphérique et température de l'eau brute salée. Ils ont comparé les résultats avec les résultats théoriques du modèle de Sherwood et Pigford (1952); développé pour l'évaporation sur les surfaces à l'intérieur de tunnels de vent. Tout comme le prédisait le modèle, ils ont trouvé qu'une augmentation de la température de l'air, de la vitesse du vent et de la température du bain d'eau salée augmentent le taux d'évaporation. Par contre une augmentation de l'humidité et de la concentration en sel du bain réduisent le taux d'évaporation. Il semble aussi que l'effluent de trempage, même exempt de matières en suspension par une filtration, ait un plus faible taux d'évaporation que la solution salée pure utilisée par le modèle. C'est que la pression de vapeur de l'effluent de trempage est plus faible que celle de l'eau salée en raison des autres composantes.

Rai et al. (2000) ont aussi testé l'évaporation solaire de la liqueur de trempage et de conservation (diluée à différentes concentrations) à partir d'un plateau simple. Ils ont tenté d'améliorer le taux d'évaporation en augmentant la surface d'évaporation en ajoutant des tubes de verre flottants enroulés dans un tissu noir. Ils ont noté une augmentation du taux d'évaporation de 26% avec l'ajout des tubes à cause de la plus grande surface disponible et de la plus grande quantité d'énergie solaire absorbée par

les tubes noirs. Tout comme Srinivasa Kannan et Rao (2000), ils ont aussi noté une augmentation du taux d'évaporation avec une augmentation de la vitesse du vent et une diminution de la concentration de l'effluent. De plus, ils ont observé que le taux d'évaporation diminuait avec une plus une couche d'eau brute plus profonde.

Les expériences mentionnées ci-dessus sur des effluents de tanneries ont toutes été effectuées sur des effluents filtrés; très réduits en matières en suspension. La forte teneur en matières en suspension de l'effluent de tannerie pourrait donc se révéler un autre facteur limitatif à l'application de la distillation. Toujours avec l'idée de chercher des méthodes simples et peu coûteuses, il semble que la simple sédimentation pourrait enlever une grande partie des matières en suspension, du chrome et même de la demande en oxygène, selon Song et al. (2000). Lui et son équipe ont laissé reposer dans une colonne transparente et graduée un mélange des effluents finaux d'une tannerie anglaise. Après 3 heures de repos, la matière en suspension était clairement décantée, laissant un surnageant presque clair et une limite très visible entre la matière décantée et le surnageant. Des analyses effectuées sur le surnageant ont montré une réduction de 41,5% de la demande chimique en oxygène, une réduction de 83,2% du chrome et une réduction de 76,1% des matières en suspension. Le volume de la boue sédimentée était de 28% du volume total de l'eau usée mélangée.

Ates et al. (1997) ont aussi analysé les effluents après une décantation de 3 heures. Ils ont obtenu une réduction de 73% des matières en suspension, une réduction de la demande chimique en oxygène de 51% et un enlèvement du chrome de 64%. Ces résultats sont très similaires aux résultats de Song et al. (2000)

Chapitre 3 : Méthodologie

Ce chapitre inclut les détails de la méthodologie utilisée pour ce projet. Les contraintes du contexte industriel mexicain ont souvent dicté des modifications à l'approche académique habituellement suivie lors d'un projet de recherche. Cependant, ces modifications ont été, somme toutes légères et se sont limitées à des contraintes financières pour l'embauche de main d'œuvre et l'achat de matériel. Ce chapitre inclut donc les détails concernant les objectifs du design, les matériaux, les outils et la main d'œuvre disponibles. De plus, la conception des prototypes et le déroulement des essais y sont expliqués.

3.1 Objectif du design

Les partenaires industriels mexicains ont défini leurs objectifs dès le départ. Ils désiraient développer un prototype simple de distillation solaire dans le but de concentrer les polluants et récupérer l'eau distillée pour réutilisation à la tannerie. Pour ce faire, plusieurs contraintes étaient posées : l'appareil devait être construit à partir de matériaux simples, disponibles et peu coûteux; tous les mécanismes devaient être simples, faciles d'entretien et ne nécessitant aucune main d'œuvre spécialisée; et finalement, l'appareil ne devait utiliser que l'énergie solaire pour son fonctionnement.

3.2 Matériaux et outils disponibles

Le séjour au Mexique s'est déroulé de mai à novembre 2002. Les deux premiers mois furent consacrés à l'étude du processus industriel et des effluents à traiter, ainsi que l'analyse des outils et matériaux disponibles. D'après les résultats des analyses de laboratoire annuelles demandées par la municipalité, les effluents de la

tannerie Migara seraient comparables aux effluents mentionnés dans la littérature et auraient tendance à se comporter de façon similaire.

La tannerie est située en milieu urbain, tout près de plusieurs commerces et des différents distributeurs de matériaux. Les matériaux non-travaillés comme les tubes d'acier (pour l'armature), les feuilles d'acier inoxydables miroirs et les vitres sur mesure étaient disponibles facilement et un grand choix était offert. Par contre le matériel plus technique comme la tuyauterie (valves, robinets), les piles et les appareils à moteur comme les pompes et ventilateurs étaient plus difficiles à dénicher et le choix était limité. Pour ce projet, les matériaux choisis l'ont donc été à partir du matériel disponible localement et rien n'a été importé de l'étranger. Il s'agissait de développer une technologie facilement distribuable au marché mexicain.

3.3 Main-d'œuvre

Pour les mêmes raisons d'accessibilité de la technologie à tous les tanneurs mexicains, aucun outil ou main-d'œuvre supplémentaire ne devait être nécessaire au projet de recherche. Les outils utilisés pour la construction des prototypes sont les outils disponibles à l'usine pour les opérations régulières de maintenance. Les prototypes devaient aussi être construits sans une main-d'œuvre hautement spécialisée. Un atelier de vitres et aussi un ferblantier (pour la soudure) étaient situés dans le quartier. Pour l'entretien de l'appareil, les ouvriers de l'usine devaient pouvoir compléter les tâches régulières sans problème.

3.4 Conception des prototypes

Comme la plupart des tanneries situées en zone urbaine, peu d'espace de terrain était disponible pour installer les appareils solaires. Les appareils étaient donc

planifiés en fonction d'une utilisation sur les toits. À la tannerie Migara, un toit plat renforcé de 15 mètres par 15 mètres était à disposition.

Les prototypes ont été construits dans les ateliers de la tannerie, avec l'aide du ferblantier local pour la soudure. Ils ont été conçus à l'échelle réelle, en planifiant une connexion future en série et en parallèle pour augmenter la capacité de traitement au toit entier. Les dimensions des appareils ont été choisies en fonction des dimensions commerciales des matériaux utilisés. De cette façon, les coupes et les unions sont minimisées, la qualité du matériel est maintenue et les pertes de matériel sont évitées. Par exemple, les feuilles d'acier commerciales avaient une grandeur standard de 4 pieds par 8 pieds (2,43m X 1,22m). Tous les prototypes sont donc constitués d'un canal d'eau usée et d'un réflecteur de 2,43 m.

Les prototypes ont été conçus d'après les résultats de la revue de la documentation sur les distillateurs solaires utilisés dans le monde. Cinq prototypes ont été construits et testés. Les détails et l'analyse du design de chaque prototype construit, ainsi que les résultats des essais se retrouvent dans le prochain chapitre.

3.5 Essais

Chaque prototype a été testé sur plusieurs paramètres. Le but des essais était de vérifier la productivité et le bon fonctionnement des différentes composantes des prototypes, en plus de vérifier leur comportement sous le soleil du Mexique. Il était par la suite possible d'effectuer des modifications aux appareils pour optimiser leur productivité d'évaporation et de condensation.

Les essais ont été effectués par lot, avec de l'eau propre, à raison d'un lot par jour. Plusieurs auteurs ont affirmé que le comportement d'évaporation de l'eau usée était très similaire à celui de l'eau propre, (Jhorar et Malik 1993) (McKeough et

Fagnäs 1999). Le canal a été rempli manuellement au début de la journée, avant le lever du soleil. Durant une journée ensoleillée typique, la température de l'eau du canal, l'humidité relative, ainsi que le volume d'eau distillée récupérée ont été mesurés à intervalles réguliers durant la journée. La quantité d'eau évaporée pouvait être mesurée à la fin de la journée par une graduation à l'intérieur du canal d'eau usée. La température a été mesurée à l'aide d'un thermomètre à cadran Bi-therm Taylor, (+/- 2.5°C). L'humidité relative a été calculée à l'aide d'un graphique psychrométrique pour 1 atm de Zang et Pate (1988) à partir des températures sèches et humides. Les résultats des essais suivent au prochain chapitre.

Chapitre 4: Résultats

Ce chapitre présente les résultats du travail d'analyse de la problématique, des solutions existantes et des outils disponibles pour la conception d'un prototype de distillateur le plus efficace possible. En première partie, les détails de chacun des designs sont expliqués. La deuxième partie inclut les résultats des essais des cinq prototypes.

4.1 Conception des prototypes

4.1.1 *Concentrateur de rayons solaires avec canal ouvert*

Le premier objectif a été d'élaborer un prototype qui chaufferait l'eau à une plus haute température que les distillateurs traditionnels à bassin simple pour augmenter le taux d'évaporation. Pour ce faire, des réflecteurs miroirs concaves ont été construits en forme demi-cylindrique et placés sous un canal situé au point focal dans le but d'y concentrer le maximum d'énergie solaire.

4.1.1.1 Réflecteurs

Des réflecteurs paraboliques circulaires (formés en cylindres) ont été choisis pour simplifier la localisation du point focal, point de concentration des rayons solaires parallèles reçus sur les réflecteurs. Pour un demi-cylindre étendu horizontalement, des rayons solaires arrivant verticalement sont reflétés en un point situé à mi-chemin entre le centre géométrique du cercle et la paroi du cercle. En d'autres mots, à la moitié du rayon de cercle parallèle aux rayons solaires entrants.

Le canal d'eau usée a été posé au long des points focaux des réflecteurs. L'appareil a été placé en orientation est-ouest. Cette orientation permet de recevoir

des rayons solaires ayant une composante verticale durant toute la journée. Selon la position du canal d'eau et des réflecteurs semi-cylindriques, une orientation nord-sud permettrait la concentration de rayons solaires sur le canal d'eau usée seulement lorsque l'angle du soleil est entre 60° et 120° (voir figure 4.1) de l'horizontal.

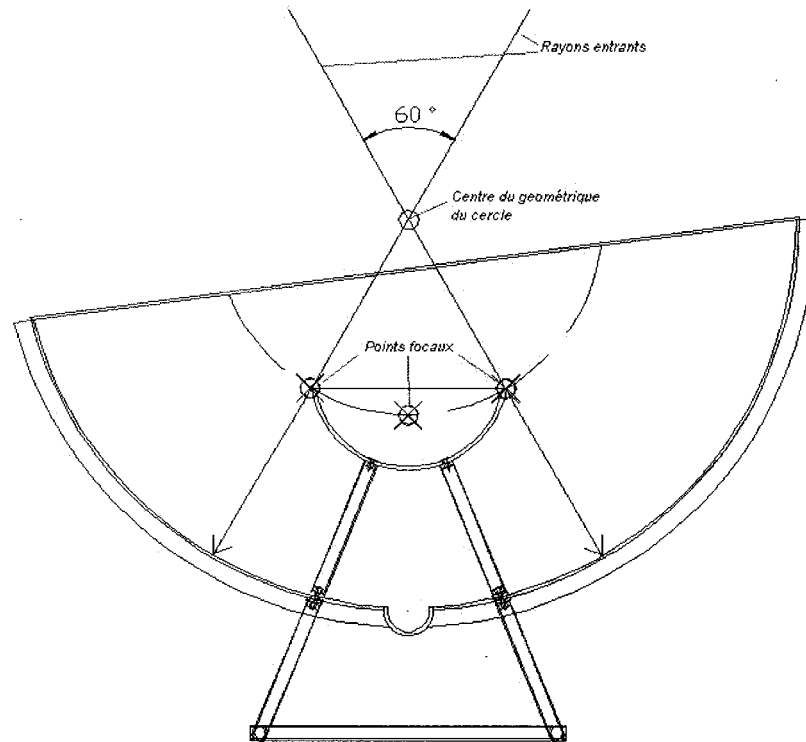


Figure 4.1 : Angle du soleil nécessaire à la concentration des rayons sur le canal pour une orientation Nord-Sud de l'appareil.

L'angle du soleil en juin, à Leon, est présenté à la figure 4.2. Selon les figures 4.1 et 4.2, le temps d'efficacité des réflecteurs seraient seulement entre 12h00 et 16h40 avec une orientation nord-sud. Une orientation nord-sud implique aussi plus de perte d'énergie par l'ombre de ces mêmes réflecteurs. Une orientation est-ouest et des extrémités vitrées offrent le maximum de rayons solaires concentrés sur le canal d'eau usée.

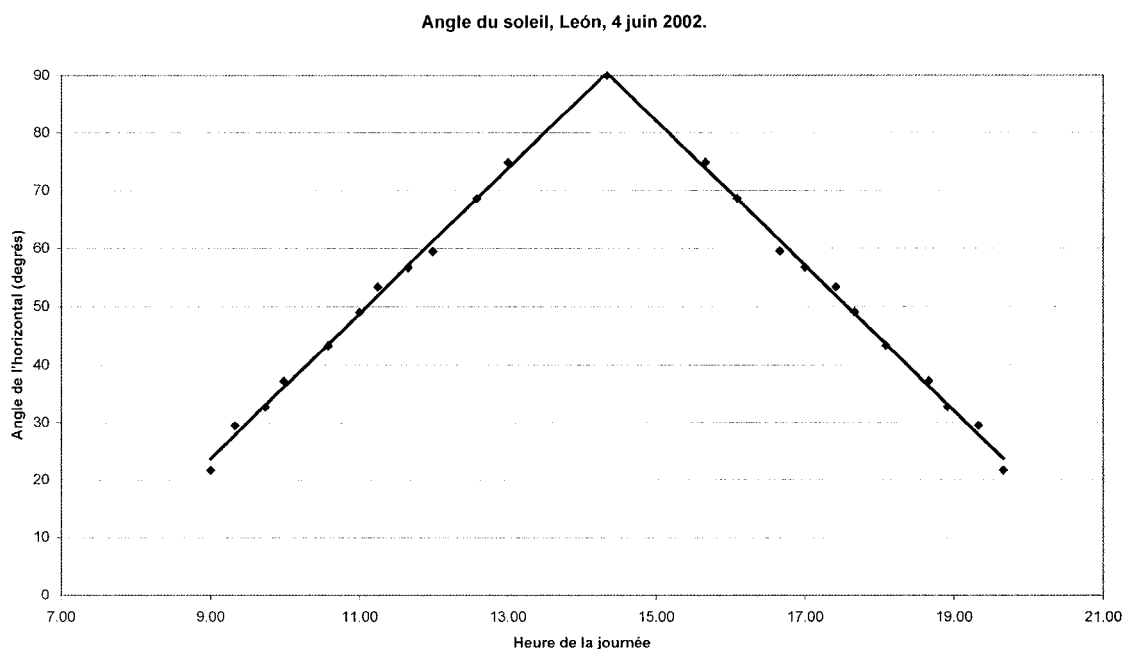


Figure 4.2 : Angle du soleil à Leon, Mexique, 4 juin 2002.

L'orientation de l'ouverture des réflecteurs a été légèrement inclinée vers le sud pour suivre l'origine plus exacte des rayons solaires, qui ne sont pas totalement verticaux au Mexique. De plus, cette inclinaison améliore le site de condensation de l'appareil à cause du vent direct sur la vitre qui la refroidit.

Les dimensions des réflecteurs ont été choisies en fonction des dimensions commerciales des matériaux utilisés. De cette façon, les coupes et les unions sont minimisées, la qualité de réfléchissement du miroir est donc optimisée et les pertes de matériel sont évitées. À León, les dimensions commerciales des feuilles d'acier inoxydable sont de 4 pieds par 8 pieds. Les dimensions des réflecteurs et donc du distillateur, ont été définies par cette donnée, en appliquant une seule coupe au centre de la feuille pour le canal de récupération de l'eau distillée. Les feuilles d'acier utilisées pour former le canal d'eau usée sont aussi disponibles en format commercial de 4 pieds par 8 pieds (1,2m X 2,4m), et sont donc facilement compatibles avec

l'appareil sans ajustement majeur. Le prototype a été construit de grandeur originale, en planifiant une connexion future en série avec d'autres appareils pour augmenter la capacité de traitement. Les plans détaillés des prototypes se retrouvent en annexe.

4.1.1.2 Canal d'eau usée

Le canal d'eau usée a été posé au point focal des réflecteurs. Le canal est aussi de forme semi-cylindrique, mais plus large (20cm) que profond (8.5 cm). De cette façon, le canal couvre plus de points focaux pour des rayons incidents qui ne seraient pas parfaitement verticaux. Ce jeu de 30° vers le nord ou le sud permet l'efficacité des réflecteurs à concentrer les rayons solaires vers le canal en toute saison. (voir figure 4.1) Le canal a été construit à partir d'une feuille d'acier de 3mm d'épaisseur roulée à la forme requise et peinte de peinture à l'époxy noire. La peinture à l'époxy a été choisie pour sa grande résistance à la corrosion.

4.1.1.3 Site de condensation

Dans le but de conserver toutes les vapeurs d'eau produites, une vitre a été placée sur les réflecteurs et les joints ont été scellés avec du silicone pour créer un environnement clos. Lors de son réchauffement, l'eau s'évapore dans cet environnement autour du canal. La vitre qui recouvre les réflecteurs est plus fraîche que le reste du matériel métallique. Des gouttes de vapeur d'eau condensée s'y forment et descendent par gravité le long de la vitre inclinée. Les gouttes suivent ensuite les réflecteurs et sont récupérées dans un canal de récupération d'eau distillée situé en bas de l'appareil, sous le canal d'eau usée. Pour récupérer l'eau distillée au bout du canal de récupération, l'appareil entier a été soulevé de 3 cm à une extrémité, ce qui donne un angle faible de 3° à l'appareil pour faire circuler l'eau distillée par gravité, sans affecter l'entrée des rayons solaires et l'évaporation.

4.1.1.4 Canal plastique de récupération auxiliaire

Durant les premiers tests, plusieurs des gouttes qui glissaient sur les réflecteurs de métal chauds se dispersaient et s'évaporaient de nouveau avant de s'écouler jusqu'au canal de récupération. Pour éviter cette ré-évaporation, un petit canal de plastique a été apposé pour recueillir les gouttes d'eau distillée à la fin de leur descente sur la vitre et ainsi éviter leur dispersion sur le métal brûlant. Le petit canal de plastique laisse l'eau distillée s'écouler à trois points de chute jusqu'au canal du bas; aux deux extrémités et au centre. Il a par la suite été observé que le petit canal permettait un flux plus continu et moins d'évaporation des gouttes d'eau distillée. La figure 4.3 montre une coupe de l'appareil et la figure 4.4 montre une photographie de l'appareil assemblé sur le toit de la tannerie.

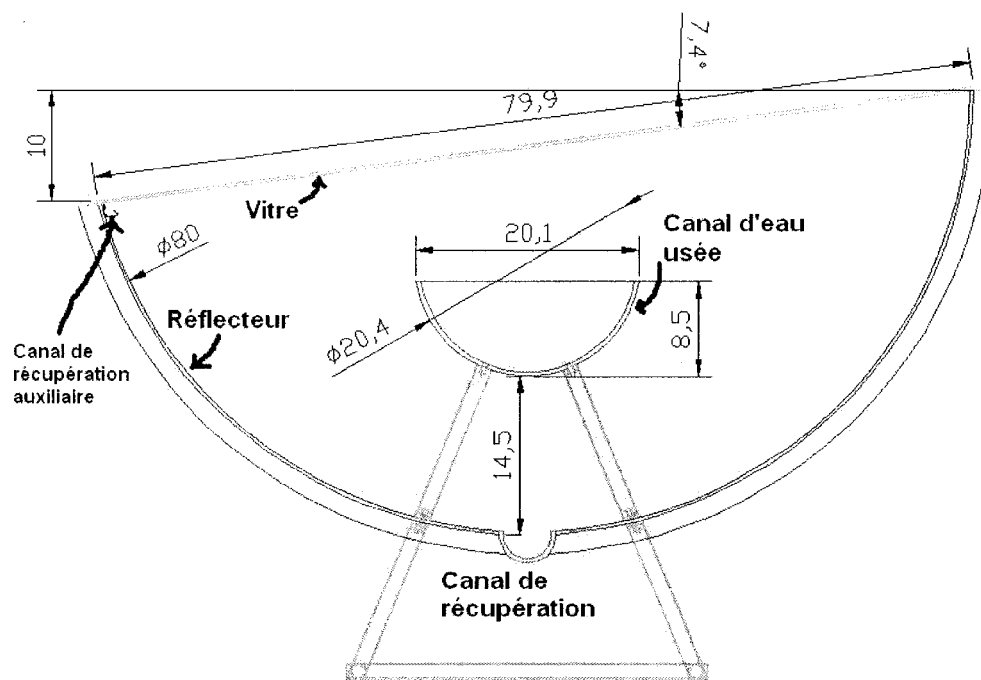


Figure 4.3 : Coupe de l'appareil (dimensions en cm)

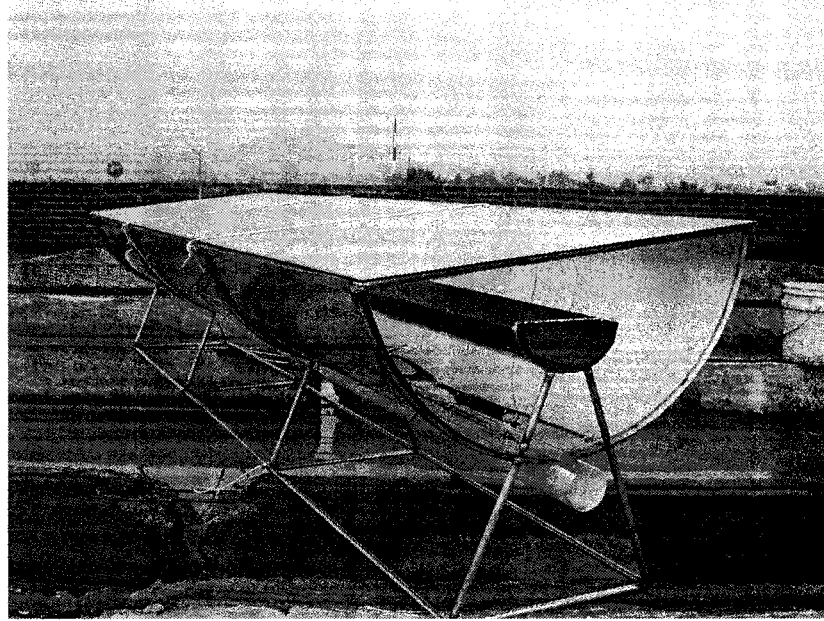


Figure 4.4 : photographie de l'appareil assemblé sur le toit de la tannerie

4.1.2 Concentrateur isolé avec canal semi-fermé

4.1.2.1 Isolation

Durant les premiers tests, des pertes de chaleur ont été observées par les réflecteurs de métal qui se réchauffaient beaucoup. Une mousse de poly-uréthane a donc été posée sur l'extérieur des réflecteurs. Par cette isolation, on espérait pouvoir diminuer les pertes de chaleur, donc augmenter la température de l'air ambiant au canal, et finalement élever et maintenir une plus haute température de l'eau du canal.

4.1.2.2 Canal semi-fermé

Des tests maison nous ont prouvé qu'un canal de métal noir complètement fermé (donc une plus grande surface de contact avec le métal chaud) aidait à élever la température de l'eau de façon significative. Le canal ouvert a donc été changé pour un canal semi-fermé dans le but d'augmenter la température de l'eau, tout en laissant

s'évaporer les vapeurs recherchées. La même feuille d'acier et peinture à l'époxy ont été utilisées pour ce canal. Comme les vitres de côté n'ont pas été changées, les dimensions du nouveau canal étaient les mêmes que le canal précédent pour entrer dans les trous latéraux. Le nouvel ajout était un couvercle du même acier peint. Le couvercle pouvait être retiré facilement pour les tâches d'entretien. Pour laisser passer les vapeurs d'eau jusqu'à la vitre, 25 trous de 5 mm de diamètre ont été ouverts dans le couvercle. De cette façon, plus de chaleur pouvait être maintenue à l'intérieur du canal tandis que les vapeurs pouvaient s'évaporer dans l'air ambiant jusqu'à la vitre pour être condensées. De la même façon que les tests précédents, des nouveaux tests ont été effectués durant des journées ensoleillées.

4.1.3 Concentrateur avec condensateur externe

Les tentatives effectuées avec le canal semi-fermé ont permis d'élever significativement la température dans tout l'appareil pour optimiser l'évaporation, ce qui en même temps a diminué le taux de condensation. L'optimisation de l'évaporation impliquait de maintenir une très haute température de l'air ambiant à l'eau usée. La condensation, quant à elle, ne se produisait que lorsqu'une partie de l'appareil était refroidi. Refroidir une partie de l'appareil, comme la vitre pour aider la condensation, aurait été une perte d'efficacité d'évaporation. En séparant les deux procédés dans des appareils distincts, il était plus facile de contrôler la température et d'optimiser l'efficacité des deux procédés. La condensation devait avoir lieu à l'extérieur de l'appareil. Au même concentrateur isolé avec canal semi-fermé, s'est ajouté un système de circulation d'air pour sortir les vapeurs du canal et les amener à un condensateur externe. Le condensateur utilisé fonctionne comme un échangeur de chaleur pour refroidir les vapeurs pour les condenser et récupérer les gouttes d'eau à la sortie. L'idée est de passer les vapeurs chaudes par un tube refroidi par un milieu thermique plus froid comme de l'eau ou de l'air.

4.1.3.1 Système de circulation de l'air

Le système de circulation d'air est formé de tubes de PVC renforcés de 1 pouce de diamètre. Les tubes provenaient de surplus de matériel de la tannerie et ont été fournis par le tanneur. Le réseau a été facilement connecté et scellé avec du silicone. Les tubes ont été connectés avec le condensateur et un ventilateur de 12 volts pour sortir les vapeurs du canal et les envoyer directement au condensateur rempli d'eau fraîche qui refroidira les vapeurs. Pour les tests sur notre appareil pilote, le ventilateur était branché sur une connexion électrique, mais ce type de ventilateur avait été choisi pour sa possibilité de fonctionner sur une pile solaire en région où l'électricité ne serait pas ou peu disponible. La figure 4.5 montre une illustration du système de circulation et la direction donnée par le ventilateur.

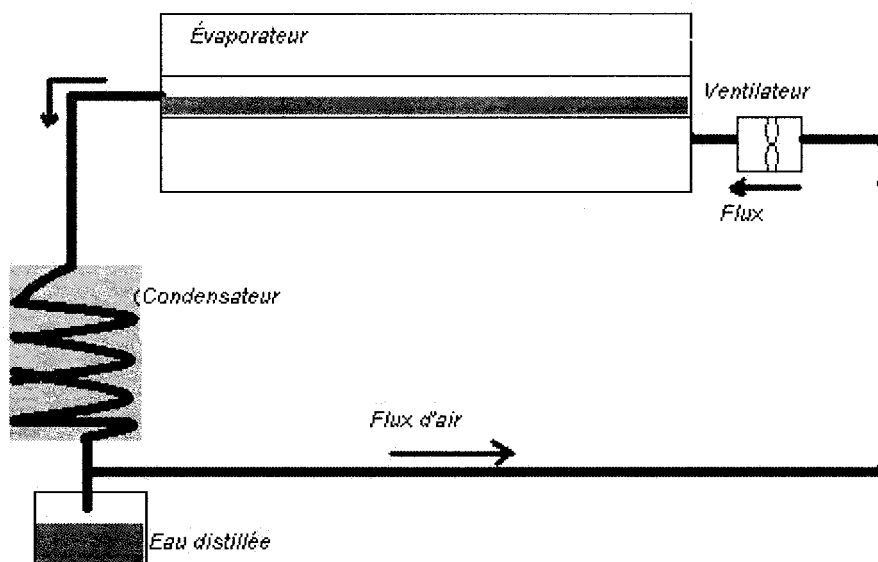


Figure 4.5 : Illustration du système de circulation d'air

Cette configuration a été choisie dans le but de permettre aux vapeurs de sortir directement au condensateur. De plus, elle permet de condenser les vapeurs avant qu'elles n'atteignent le ventilateur, ce qui risquerait d'endommager le moteur

électrique. En théorie, si l'air qui circule par le condensateur est refroidi par l'environnement, le point de saturation de l'air est diminué. Une grande quantité de vapeurs devraient donc se condenser jusqu'au nouveau point de saturation de cette température. De l'eau a été utilisée comme milieu d'échange de chaleur dans le condensateur à cause de sa disponibilité, de son prix abordable et de ses capacités thermiques modérées. L'eau froide disponible était à une température de 22° C.

4.1.3.2 Condensateur externe

Le premier condensateur a été construit avec un sceau de 19 litres. A l'intérieur du sceau a été fixé 1.5 m de tube de plastique flexible de 1 pouce de diamètre (paroi de 3 mm) en forme de serpentín descendant, jusqu'à sa sortie par un trou au fond du sceau. Tous les branchements ont été scellés avec du silicone pour pouvoir remplir le sceau d'eau froide.

4.1.3.3 Filets de métal

Des filets de métal ont aussi été installés à l'intérieur des tubes pour capter les vapeurs et forcer la condensation. Cependant, un seul filet installé bloquait la circulation d'air dans le système en se remplissait d'eau, vu la faible pression appliquée par le ventilateur. Ils ont donc été retirés pour la suite des essais.

4.1.4 Condensateur 2

Plusieurs problèmes visibles du premier condensateur ont pu être identifiés pour correction. Il semblerait que l'absorption thermique de l'eau du bassin ait été insuffisante car l'eau se réchauffait très rapidement et n'était plus efficace pour l'échange de chaleur. Deuxièmement, les parois du tube de plastique étaient très épaisses pour une conduction efficace de la chaleur. De plus, le tube était court et le parcours dans le condensateur semblait insuffisant pour provoquer la condensation. Il a aussi été considéré que l'air qui entraît dans le condensateur n'était pas saturé en

vapeur à cause de la configuration du système de circulation d'air qui passe par l'extérieur du canal semi-fermé. Un changement de configuration était donc de mise.

Pour ce deuxième condensateur, un contenant de type poubelle d'une capacité de 100 litres a été acheté, ainsi que 15 m de tube de plastique flexible de $\frac{1}{4}$ pouce de diamètre (paroi 1 mm).

4.1.4.1 Structure de maille

Un cylindre de 45cm de diamètre et 1m de hauteur a été formé avec de la maille de poule dans le but d'y fixer le tube du condensateur au centre du contenant. De cette façon, le tube est placé sur une structure fixe au centre du contenant (contrairement au premier condensateur, où les tubes étaient fixés sur les parois du sceau), ce qui optimise le transfert de chaleur avec l'eau. 12 m de tube ont été fixés à la maille en formant un serpentín descendant. Cette nouvelle structure offrait donc un meilleur environnement pour l'échange de chaleur par un tube plus fin et durant un plus long parcours dans le condensateur.

4.1.4.2 Nouvelle configuration

Pour obtenir un air totalement saturé en vapeurs et diminuer les fuites et les pertes de chaleur, le canal d'eau usée a été fermé et complètement scellé avec ruban à conduit et silicone. L'air sec entre donc directement à l'intérieur du canal au lieu d'entrer à l'extérieur du canal et d'être forcé vers l'intérieur du canal pour ressortir vers le condensateur. Le schéma 4.6 montre la nouvelle configuration.

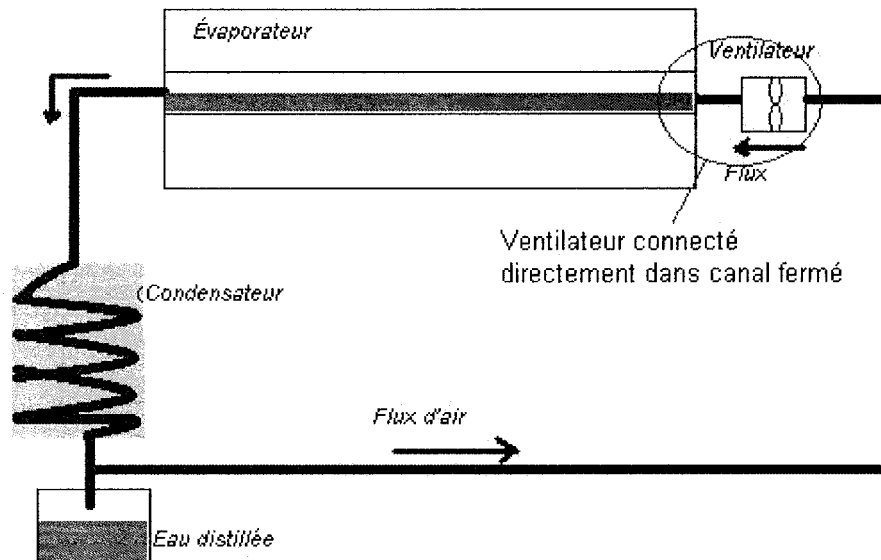


Figure 4.6 : schéma de la nouvelle configuration

4.1.5 Condensateur 3

Les résultats des essais sur le deuxième ventilateur ont laissé croire que le tube était trop fin et demandait une trop grande pression du ventilateur pour créer la circulation de vapeurs voulue. Un tube de diamètre moyen (entre 1" et 1/4") et d'une longueur plus courte était donc nécessaire pour provoquer une bonne circulation d'air dans le condensateur et optimiser l'échange de chaleur dans le circuit. 7 m de tube flexible de 1/2" ont été fixés sur le cylindre de maille dans le condensateur et connectés au système de circulation d'air.

4.1.5.1 Succion par le ventilateur

En plus de changer le tube du condensateur, le ventilateur a été déplacé pour obtenir une succion plus efficace des vapeurs vers le condensateur. Le ventilateur a été placé juste après le condensateur pour créer la plus forte succion à l'endroit où les vapeurs doivent être attirées tout en évitant de faire passer de l'air saturé en vapeurs

par le ventilateur ce qui risquerait d'endommager le moteur. La figure 4.7 montre la nouvelle configuration du système de circulation d'air.

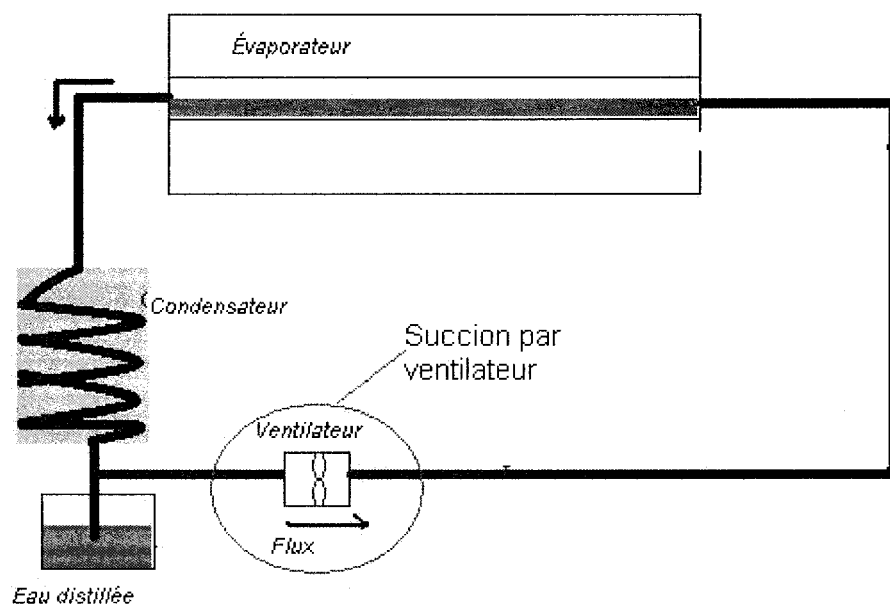


Figure 4.7 : configuration du système de circulation d'air par suction du ventilateur

4.2 Résultats des essais

Cette partie inclut les résultats des essais effectués sur les cinq prototypes de distillateurs. Les résultats des paramètres mesurés à intervalles réguliers durant la journée d'essai sont d'abord présentés pour chacun des prototypes. Des tableaux comparatifs sur la production d'eau évaporée et d'eau distillée sont ensuite présentés. Les essais se sont déroulés durant des journées typiques ensoleillées de plus de 9 heures d'ensoleillement.

4.2.1 Concentrateur de rayons solaires avec canal ouvert

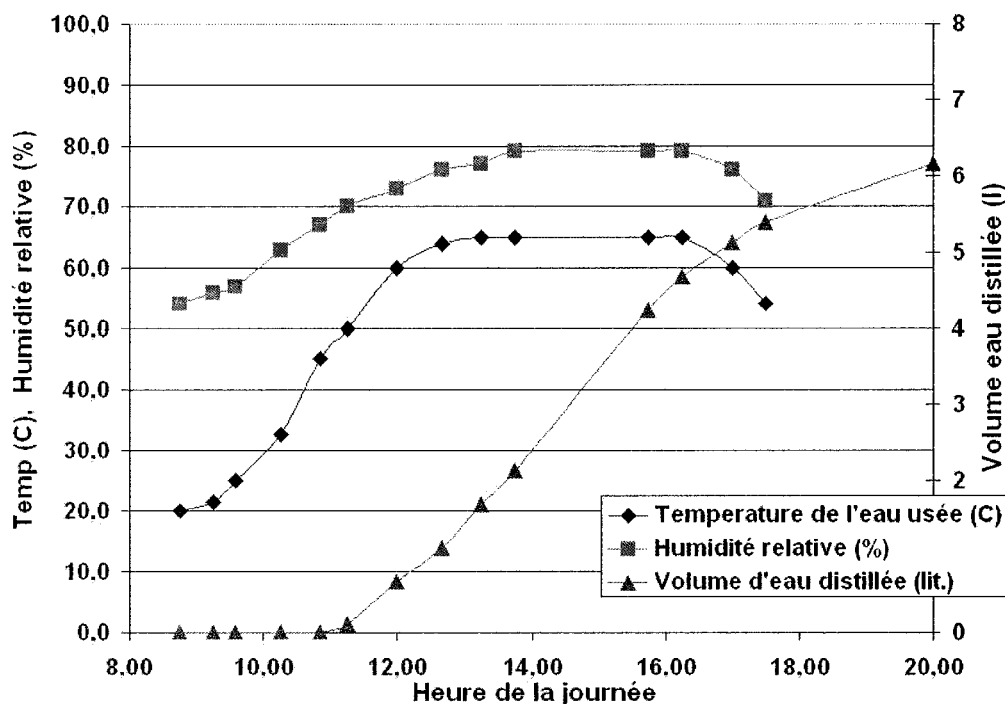


Figure 4.8 : Température de l'eau utilisée et volume d'eau distillée pour le concentrateur avec canal ouvert durant une journée ensoleillée.

Comme on peut voir dans la figure 4.8, la température de l'eau monte rapidement jusqu'à 65° et se maintient stable entre 12h00 et 16h00, soit au moment des plus fortes radiations solaires. L'humidité relative autour du canal se stabilise aussi à ce même moment à près de 80% entre 13h00 et 16h00. La condensation de l'eau est visible sur la vitre dès 10h30, lorsque la température de l'eau atteint 40°. De l'eau distillée a pu être récupérée du canal de récupération trente minutes plus tard dès 11h00.

La production d'eau distillée est stable, à 1 litre par heure durant les heures de pointe, quand la température de l'eau est à son maximum. La production diminue ensuite rapidement et la production totale quotidienne atteignait 6 litres, ce qui, pour

une superficie de $1,92\text{m}^2$, équivaut à $3,2\text{ l/m}^2\text{-jour}$. Cependant, des fuites de vapeur ont été notées, car de 8 à 10 litres d'eau étaient évaporés tandis que seulement 6 litres ont pu être condensés et récupérés. Selon l'humidité relative de l'environnement autour du canal et son volume, environ 0.8 litre d'eau pouvait être maintenu en suspension, ce qui confirme la possible fuite de 1 à 3 litre d'eau par jour avec ce premier prototype.

4.2.2 Concentrateur isolé avec canal semi-fermé

Avec ce nouveau canal et les réflecteurs isolés, la température de l'eau usée a augmenté de façon significative. La figure 4.9 suivante montre la variation de la température et de l'humidité relative à l'intérieur et extérieur du canal durant la journée.

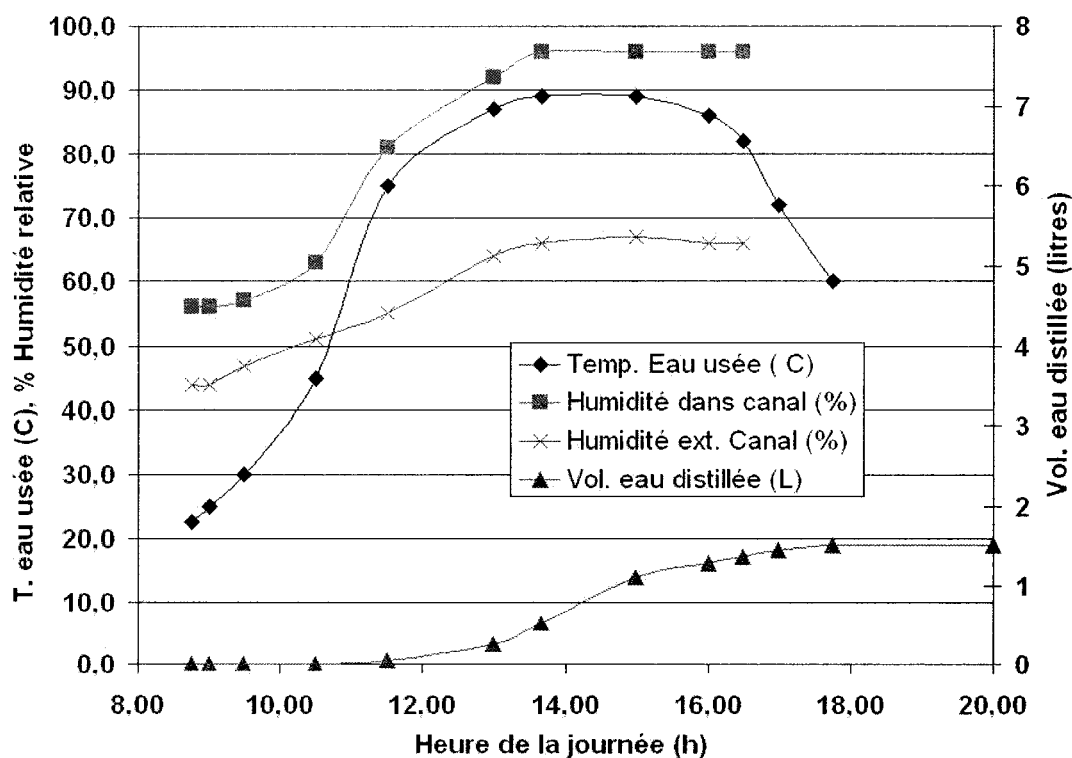


Figure 4.9 : Variation de la température de l'eau et de l'humidité relative avec le canal semi-fermé

Selon la figure 4.9 l'eau se réchauffe beaucoup plus et plus rapidement avec ce nouveau canal semi-fermé et le produit isolant. La température maximale se stabilise à une température beaucoup plus haute, jusqu'à 89°C dès 13h00. La figure 4.9 montre aussi que l'humidité relative s'élève à plus de 95% dans le canal, ce qui signifie un environnement presque saturé en vapeurs d'eau à l'intérieur du canal, tandis que l'extérieur du canal présentait une humidité relative beaucoup plus faible en se stabilisant à 65%. Néanmoins, seulement 1,5 litres d'eau distillée ont pu être récupérés durant cette journée, même si 8 litres d'eau usée se sont évaporés de ce canal avec couvercle.

4.2.3 Concentrateur avec condensateur externe

Ce premier condensateur comportait un sceau de 19 litres et 1.5 m de tube de plastique flexible de 1 pouce de diamètre (paroi de 3 mm) en forme de serpentин descendant, jusqu'à sa sortie par un trou au fond du sceau. Le ventilateur placé dans un système de circulation fermé faisait circuler les vapeurs à l'intérieur du tube du condensateur. De grandes gouttes d'eau se formaient sur les parois du tube, descendant par gravité jusqu'à la bouteille de récupération.

D'après les résultats des essais présentés à la figure 4.10 la température de l'eau usée dans le canal s'est stabilisée à 75° dès 12h00, avec une humidité relative de 85%. L'ajout du système de circulation d'air a augmenté l'évaporation de l'eau pour le même canal. 12 litres d'eau se sont évaporés durant la journée. La production d'eau distillée avec cette configuration a atteint 600 ml par heure comme maximum et ce, entre 12h00 et 15h00. La production quotidienne totale a atteint 2.6 litres.

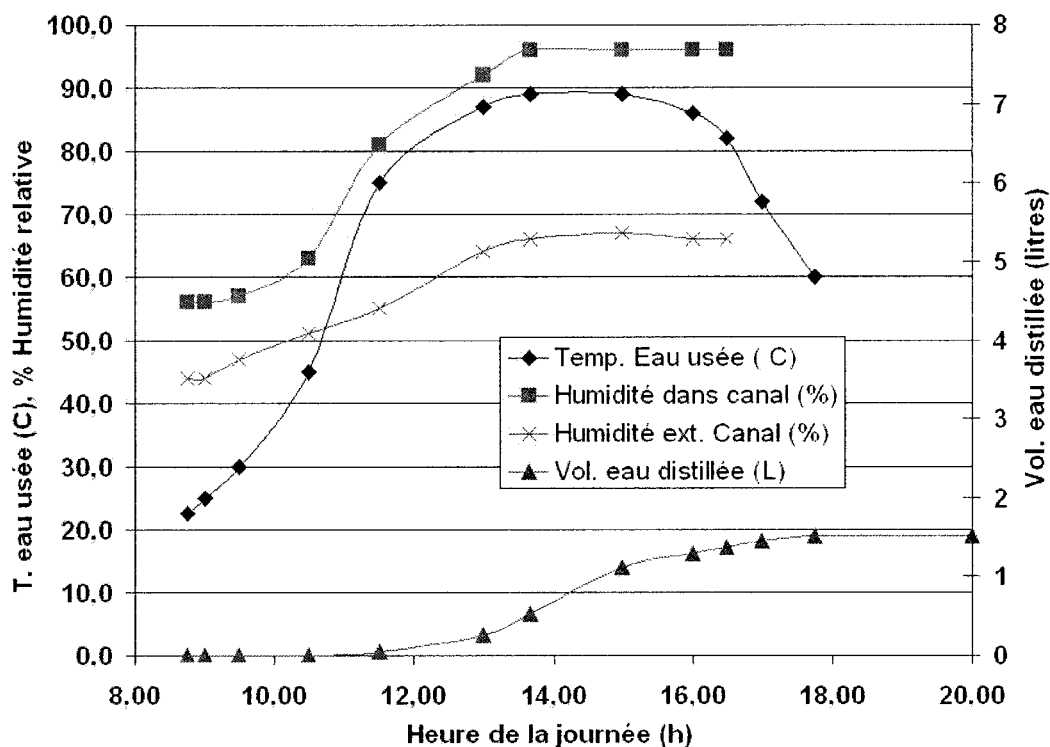


Figure 4.10 Résultats des essais avec le concentrateur avec circulation de vapeurs jusqu'à un condensateur externe

4.2.4 Condensateur 2

La figure 4.11 montre que le changement de configuration du système et la fermeture du canal ont permis d'augmenter l'humidité relative à près de 100% en tout temps à l'intérieur du canal, même si le ventilateur poussait avec succès la vapeur vers l'extérieur du canal. Cette configuration optimiserait donc la quantité de vapeurs produites. Lors d'un essai à système ouvert, donc le ventilateur en marche et le condensateur déconnecté, plus de 20 litres d'eau ont pu être évaporés et évacués durant une journée ensoleillée.

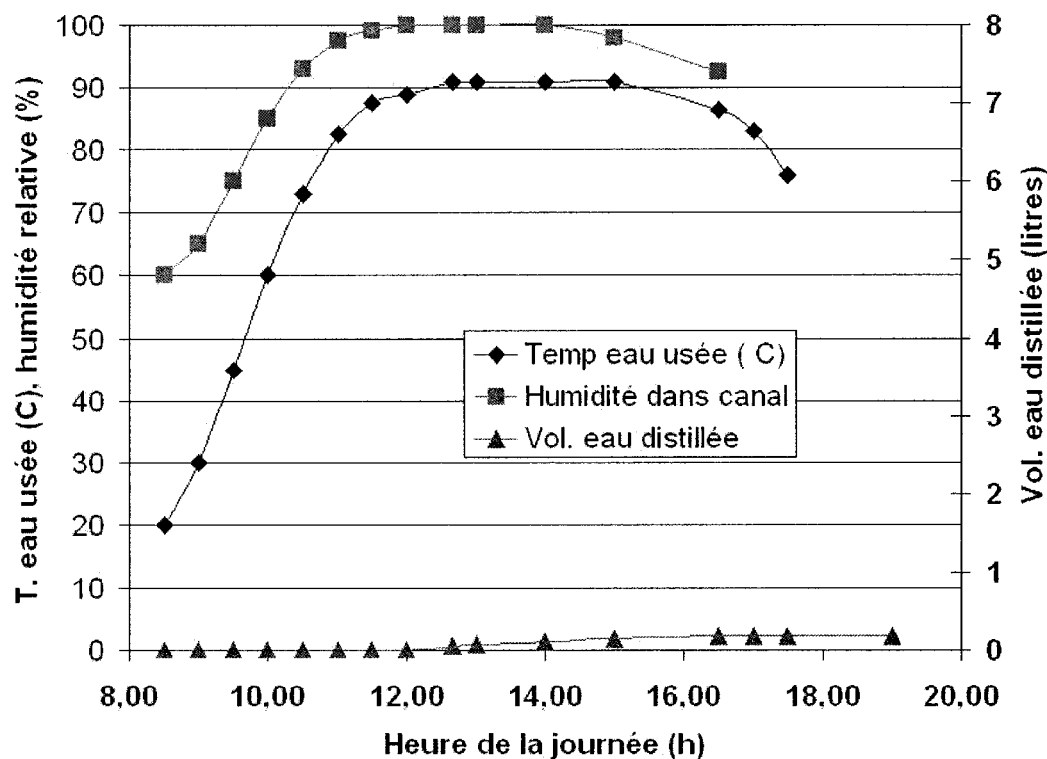


Figure 4.11 : Résultats des essais avec le concentrateur et le deuxième condensateur externe

Cependant, il semble que le ventilateur n'a pas réussi à créer une circulation d'air dans le tube très fin et très long du condensateur. Un ventilateur plus puissant de 110 volts a aussi été essayé, mais la circulation d'air n'a pas non plus pu être établie. Dans le but de réduire la pression nécessaire pour la circulation d'air dans le tube du condensateur, la longueur du tube a été réduite graduellement jusqu'à 5 mètres (réduction de 66%) mais encore une fois, sans succès. En conséquence, seulement 0.18 litres d'eau ont été récupérés en eau distillée.

4.2.5 Condensateur 3

Avec ce tube de diamètre moyen et une succion plus efficace du ventilateur, une circulation des vapeurs a pu être établie vers le condensateur, car des gouttes de

vapeurs condensées étaient visibles très tôt à l'intérieur du tube transparent. En effet, de l'eau distillée a pu être récupérée une heure plus tôt qu'avec le deuxième condensateur.

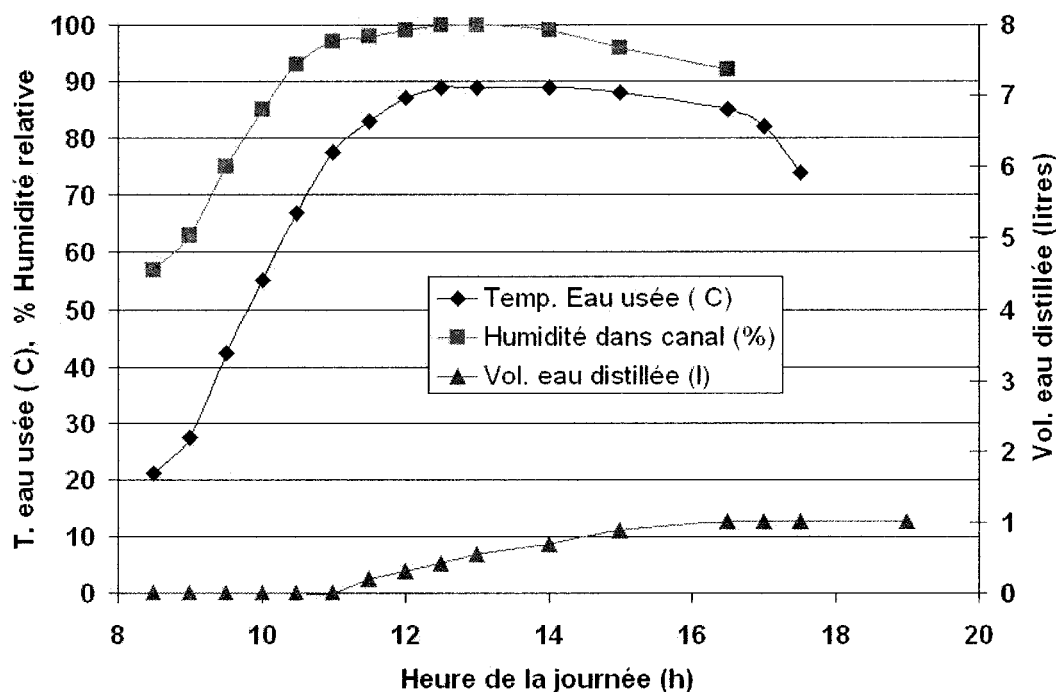


Figure 4.12 : Résultats des essais avec le concentrateur et le troisième condensateur externe

Cependant, seulement de faibles quantités d'eau distillée ont pu être récupérées à la sortie du condensateur. Des gouttes d'eau condensée semblent avoir bloqué la circulation d'air dans le tube du condensateur, ce qui bloquait le processus de condensation en bloquant l'entrée de nouvelles vapeurs dans le condensateur. Les données de température et d'humidité de l'évaporateur sont semblables aux données recueillies lors de l'essai précédent car l'évaporateur est identique. La même quantité d'eau a aussi été évaporée de l'évaporateur.

4.2.6 Comparaison des résultats des essais

Le tableau 4.1 suivant inclut un résumé des résultats pour une meilleure comparaison des différents prototypes.

Tableau 4.1 : Tableau comparatif des résultats des essais sur les cinq prototypes

	Canal	Isolation	Site de condensation	T max eau C	Humidité (dans canal) %	Eau évaporée		Eau condensée	
						ml/jour	l/m2	ml/jour	l/m2
1	canal ouvert		vitre	65	79	8000 - 10000	4.3- 5.34	6000	3,2
2	semi-fermé	oui	vitre	90	96	8000	4,3	1500	0,8
3	semi-fermé	oui	Cond.	75	87	12000	6,4	2300	1,2
4	fermé	oui	Cond.	91	100	20000	10,7	180	0,1
5	fermé	oui	Cond.	89	100	20000	10,7	1000	0,5

La figure 4.13 montre un graphique comparatif des capacités d'évaporation et de distillation des cinq prototypes.

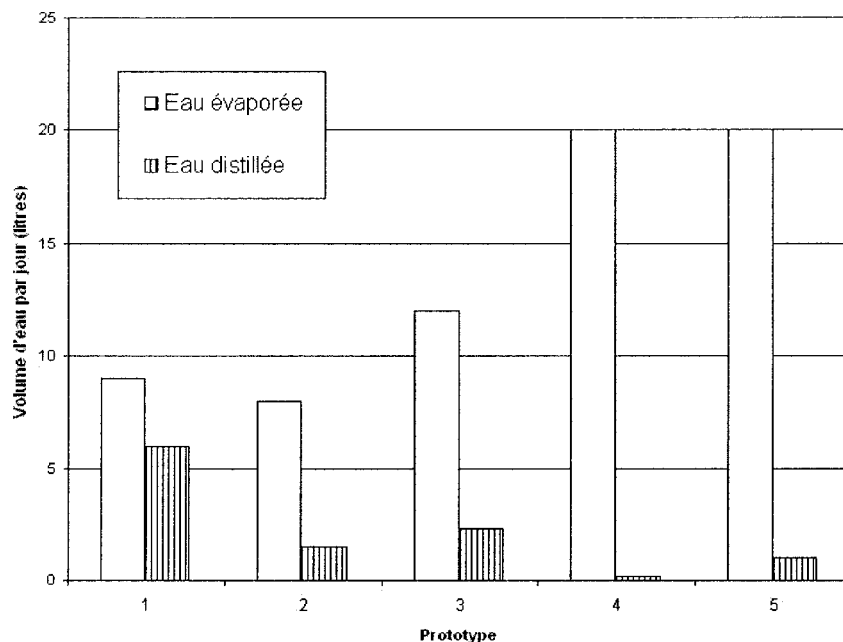


Figure 4.13 : Graphique comparatif des capacités d'évaporation et de condensation des cinq prototypes

La figure 4.13 montre que les prototypes 4 et 5 présentent la meilleure

capacité d'évaporation, donc un évaporateur optimisé. Cependant, la capacité de condensation était plutôt nulle avec ces condensateurs construits maison. La section suivante présente les calculs de développement de l'unité de condensation optimale qui serait fixée au prototype d'évaporateur testé. Celui-ci évapore 20 litres d'eau par jour en vapeur de 90° à pression atmosphérique.

4.3 Unité de distillation théorique

L'unité de condensation optimale est un échangeur de chaleur qui refroidit efficacement les vapeurs produites de l'évaporateur optimisé pour condenser et récupérer efficacement l'eau distillée. Les calculs présentés ici peuvent servir à la conception de l'échangeur de chaleur à double tuyau de cuivre nécessaire pour refroidir efficacement les 20 litres de vapeurs quotidiennes produites par l'évaporateur testé.

4.3.1 Échangeur de chaleur à double tuyau

L'échangeur de chaleur est un appareil qui transmet efficacement la chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid qui sont séparés par une paroi. L'échangeur de chaleur à double-tuyau à passage simple consiste en deux tuyaux de cuivre concentriques où s'écoulent les deux fluides qui échangent leur chaleur par convection et conduction par la paroi. L'extérieur du tuyau externe est isolé. Les fluides peuvent s'écouler parallèlement ou en sens contraire, mais la littérature (White, 1991) a plusieurs fois démontré que l'écoulement en sens contraire était plus efficace.

4.3.2 Les données du problème

L'évaporateur optimisé parvient à évaporer 20 litres d'eau par jour. Selon les essais, l'eau est efficacement évaporée pendant 6 heures par jour, entre 11h00 et

17h00 et la température de la vapeur se maintient à 90°C. Le ventilateur du système de circulation d'air produit une circulation de 0,00283 m³/sec. Un refroidissement réaliste de la vapeur entrante serait un objectif de 40°C à la sortie du condensateur, de cette façon, plus de 85% des vapeurs se seraient condensées. À 90°, l'air peut maintenir une densité de saturation de 400 g/m³, tandis qu'à 40°, l'air peut en maintenir 50 g/m³, une réduction de 87% (selon la pression de saturation de vapeur en fonction de la température, figure 2.2). L'eau de refroidissement disponible à la tannerie est la réserve d'eau propre de procédé. Le réservoir se maintient à une température de 20°C. Une pompe à débit ajustable est à disposition. Le réchauffement d'une partie de l'eau par la circulation dans l'échangeur de chaleur est plutôt négligeable car le réservoir contient plus 20 000 litres d'eau et l'échangeur de chaleur n'utilisera que quelques centaines de litres par jour, à un débit très lent. Les données de départ pour le design de l'échangeur de chaleur sont donc :

Vapeur entrante

Température de la vapeur entrante :	$T_{h\text{ in}} = 90^{\circ}\text{C}$
Densité de la vapeur :	$\rho_{90^{\circ}} = 423\text{ g/m}^3$

Température de la vapeur sortante :	$T_{h\text{ out}} = 40^{\circ}\text{C}$
Densité de la vapeur :	$\rho_{40^{\circ}} = 51\text{ g/m}^3$

Débit du ventilateur : 20 kg eau / (0,423 kg/m³ * 6 heures) = 0,00219 m³/sec
 $\dot{m}_h = 0,000926\text{ kg/sec}$

Production d'eau distillée résultante :
 (20 kg eau / 0,423 kg/m³) * ($\rho_{90^{\circ}} - \rho_{40^{\circ}}$) = 17,59 kg eau / jour

Eau de refroidissement

Température de l'eau entrante :	$T_{c\text{ in}} = 20^{\circ}\text{C}$
---------------------------------	--

Débit posé :	$\dot{m}_c = 0,03125\text{ kg/s}$ (1 lit./30 sec)
--------------	---

Les propriétés physiques et chimiques de la vapeur et de l'eau de refroidissement sont connues et tirées ici des ouvrages sur les transferts de chaleur

(White, 1991 et Watson et al., 1980).

4.3.3 Définition des variables et Analyse théorique

L'analyse théorique des échangeurs de chaleurs concentriques est couverte dans la plupart des livres sur les transferts de chaleur. Les trois équations de conservation du transfert de chaleur sont :

$$q = \dot{m}_h c_{p_h} (T_{h_{in}} - T_{h_{out}}) \quad [1]$$

$$q = \dot{m}_c c_{p_c} (T_{c_{out}} - T_{c_{in}}) \quad [2]$$

$$q = U A \delta T_{LM} \quad [3]$$

où q = taux de transfert de chaleur de l'échangeur (W)

c_p = chaleur spécifique du fluide (J/kg-°C)

T = Température (°C)

U = coefficient de transfert de chaleur général (W/m²-°C)

A = surface active de l'échangeur de chaleur (m²)

δT_{LM} = Différence de Température Log-moyenne

$$\delta T_{LM} = \frac{(T_{h_{out}} - T_{c_{in}}) - (T_{h_{in}} - T_{c_{out}})}{\ln \left[\frac{(T_{h_{out}} - T_{c_{in}})}{(T_{h_{in}} - T_{c_{out}})} \right]} \quad [4]$$

et

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{k} \ln \left(\frac{r_i}{r_o} \right) + \frac{r_i}{r_o h_o}} \quad [5]$$

r_i = rayon intérieur du tuyau (paroi entre les deux fluides) (m)

r_o = rayon extérieur du tuyau (paroi entre les deux fluides) (m)

h_i = coefficient de transfert de chaleur par convection de la vapeur chaude ($\text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{K}$)

h_o = coefficient de transfert de chaleur par convection de l'eau froide ($\text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{K}$)

k = coefficient de transfert de chaleur par conduction du cuivre ($\text{W/m-}^\circ\text{K}$)

Les indices i = intérieur
 o = extérieur
 in = entrant
 out = sortant
 c = froid (eau de refroidissement)
 h = chaud (vapeur)

Selon les trois équations de transfert de chaleur dans un échangeur et les données disponibles et mentionnées ci-haut, seulement quelques variables sont inconnues. Le design de l'échangeur de chaleur consiste en un double tuyau concentrique à passage simple, en descente graduelle pour la récupération gravitaire de l'eau distillée. La nature et les débits des deux fluides sont connus et facile à contrôler. La température sortante de l'eau de refroidissement peut facilement être calculée en égalisant les équations 1 et 2. Les dimensions des deux tuyaux sont par la suite posées selon des standards commerciaux. Ici le tuyau central est de diamètre $\frac{1}{2}$ pouce tandis que le tuyau extérieur a un diamètre de 1 pouce. La dernière variable nécessaire au design de l'échangeur de chaleur est sa longueur, donc la longueur des tuyaux concentriques.

La longueur de l'échangeur sera déterminée par la variable **A**, la surface active de l'échangeur de chaleur car le diamètre du tuyau est déjà connu.

Voici donc l'ordre des calculs à effectuer pour trouver la longueur de l'échangeur de chaleur :

a) Trouver $T_{c\ out}$, en calculant le transfert de chaleur total **q** avec les équations 1 et 2.

b) Trouver δT_{LM} avec l'équation 4.

c) Trouver U avec l'équation 5 :

- i) Trouver h_i et h_o par les corrélations de Nusselts en fonction des nombres de Reynolds et de Prandtl qui varient selon la forme des tuyaux et de la turbulence du débit.

d) Trouver A avec l'équation 3.

e) Calculer la longueur selon le diamètre moyen du tuyau interne.

4.3.4 Calcul des variables

a) Trouver $T_{c\ out}$

$$q = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h_{in}} - T_{h_{out}}) \quad [1]$$

$$C_{p_{vapeur\ 90^\circ}} = 2000 \text{ J/kg-}^\circ\text{C}$$

$$q_h = (0,00092637 \text{ kg/s}) (2000 \text{ J/kg-}^\circ\text{C}) (90 - 40 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$\boxed{q_h = 92,6 \text{ W}}$$

$$q = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c_{out}} - T_{c_{in}}) \quad [2]$$

$$C_{p_{eau\ 20^\circ}} = 4179 \text{ J/kg-}^\circ\text{C}$$

$$93 \text{ W} = (0,002 \text{ kg/s}) (4179 \text{ J/kg-}^\circ\text{C}) (T_{c_{out}} - 20^\circ)$$

$$\boxed{T_{c_{out}} = 32^\circ\text{C}}$$

b) Trouver δT_{LM}

$$\delta T_{LM} = \frac{(T_{h_{out}} - T_{c_{in}}) - (T_{h_{in}} - T_{c_{out}})}{\ln \left[\frac{(T_{h_{out}} - T_{c_{in}})}{(T_{h_{in}} - T_{c_{out}})} \right]} \quad [4]$$

$$\delta T_{LM} = \frac{(40^\circ - 20^\circ) - (90^\circ - 32^\circ)}{\ln \left[\frac{(40^\circ - 20^\circ)}{(90^\circ - 32^\circ)} \right]}$$

$$\boxed{\delta T_{LM} = 35,7^\circ \text{C}}$$

c) Trouver U

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{k} \ln \left(\frac{r_i}{r_o} \right) + \frac{r_i}{r_o h_o}} \quad [5]$$

où $h_i = \frac{Nu_i \cdot k_i}{D_i}$ [6] Nu = nombre de Nusselt

où $Nu_i = 0,027 Re_i^{0,8} Pr_i^{1/3}$ [7] pour débit turbulent ($Re > 2000$)

où $Re_i = \frac{4 \dot{m}}{\pi \cdot D \mu_{steam}}$ [8] pour tuyaux tubulaires

i) Trouver h_i

$$Re_i = \frac{4(0,00092637) \text{ kg/s}}{\pi \cdot (0,011 \text{ m})(1,12 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s})} \quad \mu_{vapeur} = 1,12 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\boxed{Re_i = 9573,8} \quad > 2000, \text{ débit turbulent}$$

$$Nu_i = 0,027(9573,8)^{0,8} (1,02)^{1/3}$$

$$Pr_{vapeur} = 1,02$$

$$\boxed{Nu_i = 41,6}$$

$$h_i = \frac{Nu_i \cdot k_i}{D_i} \quad [6]$$

$$h_i = \frac{(41,6) \cdot (0,0222) \text{ W / m} \cdot ^\circ \text{K}}{0,011 \text{ m}}$$

$$k_{\text{vapeur}} = 0,0222 \text{ W/m}^\circ \text{K}$$

$$\boxed{h_i = 83,96 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{K}}$$

ii) Trouver h_o

$$\text{Re}_o = \frac{\rho_o \cdot V_o D_o}{\mu_o}$$

$$\text{où } V_o = \frac{\dot{m}_c \cdot v_c}{A_o} = \frac{(0,03125 \text{ kg/sec})(0,001 \text{ m}^3/\text{kg})}{[\pi(0,01175 \text{ m})^2] - [\pi(0,0065 \text{ m})^2]} = 0,104 \text{ m/sec}$$

$$\text{Re}_o = \frac{(997 \text{ kg/m}^3)(0,104 \text{ m/s})(0,013 \text{ m})}{0,857 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{sec}}$$

$$\text{Re}_o = 1572,8 < 2000, \quad \text{flux laminaire}$$

$$\text{Nu}_o = 4,36 \quad \text{pour un flux laminaire à transfert de chaleur constant}$$

$$h_o = \frac{\text{Nu}_o \cdot k_o}{D_o} \quad [6]$$

$$h_o = \frac{(4,36) \cdot (0,608) \text{ W / m} \cdot ^\circ \text{K}}{0,013 \text{ m}}$$

$$k_{\text{eau}} = 0,608 \text{ W/m}^\circ \text{K}$$

$$\boxed{h_o = 203,91 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{K}}$$

Le coefficient général de transfert de chaleur **U** peut donc être calculé :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{k} \ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right) + \frac{r_i}{r_o h_o}} \quad [5]$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{(83,96 \text{ W/m}^2\text{K})} + \frac{0,0055m}{401 \text{ W/m}\cdot\text{K}} \ln\left(\frac{0,0055m}{0,0065m}\right) + \frac{0,0055m}{(0,0065m)(203,67 \text{ W/m}^2\text{K})}}$$

$$U = 62,32 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- d) Trouver **A**, la surface active d'échange de chaleur, donc la surface du tuyau de cuivre interne.

$$A = \frac{q}{U \cdot \delta T_{LM}} \quad [4]$$

$$A = \frac{93W}{62,32 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 35,68^\circ}$$

$$\boxed{A = 0.0418 \text{ m}^2}$$

- e) Calculer la longueur selon le diamètre moyen du tuyau interne.

$$D = 1,2 \text{ cm}$$

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D} = \frac{0.0418 \text{ m}^2}{\pi(0,012 \text{ m})}$$

$$\boxed{L = 11,09 \text{ m}}$$

4.3.5 Résumé des caractéristiques du condensateur

Le tableau présente les caractéristiques de construction et de fonctionnement du condensateur.

Tableau 4.2 : Caractéristiques de l'unité de condensation théorique

Échangeur de chaleur	
Type	double tuyau à passage unique de 12 m.
Tuyau Interne	Cuivre, Diam. standard ½ pouce avec paroi de 1mm
Tuyau externe	Cuivre, Diam. Standard 1 pouce avec paroi de 1mm.
Structure	Concentrique descendante à trois virages ou moins, selon l'espace disponible
Vapeur	
Concentration	Vapeur saturée : Humidité relative > 95%
Température entrante	> 80°C
Température sortante	~ 40°C
Débit	idéal : 47,3 m ³ /jour lorsque vapeur saturée.
	système de circulation en place : 0,00283 m ³ /sec, 6 heures/jour
Circulation	circulation pour écoulement gravitaire, de haut en bas.
Eau de refroidissement	
Température entrante	20°C ou moins.
Température sortante	~ 32°C
Débit	2 litres/min = 0,031 kg/sec
Productivité du condensateur	2,93 kg eau/heure = 17,6 kg eau/ jour = 8,8 kg eau/m²-jour

4.4 Coûts

Voici la liste détaillée des coûts approximatifs de construction de l'appareil de distillation optimisé selon les prix des matériaux provenant de distributeurs locaux de Leon. Les coûts concernant le condensateur sont une évaluation. Au moment du calcul, le dollar canadien valait 7 pesos.

Tableau 4.3 : Coûts de construction du distillateur

Évaporateur	Description	Pesos	\$ Can.
	Réflecteur- feuille acier inoxydable fini miroir	300	42,86
	Canal – feuille acier épaisse	200	28,57
	Peinture époxy	40	5,71
	Tubes de support- acier inoxydable	300	42,86
	Frais ferblantier- travail métal + soudure	400	54,14
	Vitre – 2,98m X 0,84m X 4mm	500	71,42
	Canal plastique	120	17,14
	Silicone	55	7,86
	Isolant- poly-uréthane, solution en vrac à mélanger	130	18,57
	Autres- connections + plastiques	50	7,14
	Total Évaporateur	2095	299,29
Condensateur	2 tubes de cuivre- 13 m	400	54,14
	Frais ferblantier – travail métal et soudure	600	85,71
	Ventilateur	200	28,57
	Autres – connections	50	7,14
	Total Condensateur	1250	178,57
Total		3345	477,86

Ces coûts ont été défrayés pour l'achat de matériaux à l'unité pour la constructions des premiers prototypes. Les vendeurs de matériaux diminuent de beaucoup leur prix lors de l'achat de plus grandes quantités, car ces matériaux sont surtout vendus en volumes commerciaux. Pour la construction de plus de 10 appareils, les vendeurs évaluaient à 25% la réduction des coûts des matériaux.

Chapitre 5 : Discussion

Les résultats des essais de chaque prototype sont discutés dans ce chapitre. Cette analyse mène ensuite à une discussion plus globale de l'efficacité d'évaporation et de condensation des prototypes. L'utilisation du meilleur prototype pour le traitement des eaux usées de la tannerie Migara est ensuite abordée, suivi du potentiel de développement de l'appareil et des autres utilisations potentielles au Mexique et dans d'autres pays en voie de développement profitant d'un tel apport en énergie solaire.

5.1 Discussion des résultats des essais sur les prototypes

5.1.1 *Concentrateur de rayons solaires avec canal ouvert*

Ce premier prototype a été conçu dans le but d'obtenir de meilleurs résultats que les distillateurs de type bassin plat traditionnels, dont les performances moyennes sont connues par plusieurs publications scientifiques, tout en maintenant une construction et un fonctionnement très simples. Les réflecteurs paraboliques concentrent l'énergie solaire d'une plus grande surface sur le canal d'eau usée pour un réchauffement plus rapide et plus important.

Durant les essais, l'eau usée s'est rapidement réchauffée et s'est maintenue à 65°C et l'humidité relative à 80% durant les quatre heures de plus fortes radiations solaires, soit entre 12h00 et 16h00. La littérature (Malik et al. 1982) s'entend habituellement pour une température maximum autour de 50°C et une humidité relative d'environ 85-90% dans les distillateurs solaires de type bassin plat. La plus forte concentration d'énergie solaire sur le canal d'eau usée expliquerait la plus haute température (ISES 2001). L'humidité relative serait plus faible en raison du plus grand volume disponible autour du canal. Cette plus faible humidité relative soutient une plus

grande évaporation que lorsque l'air est saturé en vapeurs, mais ralentit le processus de condensation. En effet, même si 8 à 10 litres d'eau se sont évaporés durant cette journée, seulement 6 ont été récupérés après condensation. Une production d'eau distillée de 6 litres pour une surface d'appareil de 1,92 m² signifie une productivité de 3.13 litres/m²-jour. Une humidité relative de 80 % à 65°C signifie que 1290g d'eau est sous forme de vapeur par mètre cube d'air. Comme l'espace intérieur disponible dans l'appareil est de 0.6m³, un maximum de 779g d'eau étaient présents sous forme de vapeurs dans l'appareil. Des fuites des vapeurs de 1.3 à 3.2 litres peuvent donc être considérées par les joints entre les pièces.

Les publications sur les distillateurs plats mentionnent des résultats allant de 2,17 litres/m²-jour à 4 litres/m²-jour pour Sharma et Mullick (1993). La productivité du prototype se compare donc avantageusement aux résultats publiés, même pour une année 2002 plus faible en radiations solaires. En effet, les essais se sont déroulés durant la saison des pluies 2002 qui a été particulièrement pluvieuse et nuageuse. Selon le tableau 5.1 suivant, les radiations solaires moyennes reçues durant la période juillet-octobre 2002 ont été en moyenne beaucoup plus basse que la moyenne des années 1977 à 1992 au Mexique (des données disponibles sur WRDC) ce qui ne semble pas avoir été le cas en Jordanie et en Inde.

Tableau 5.1 : Radiations solaires globales à Mexico de 1977-1992 (WRDC) et 2002 (Insituto Nacional de Geofisica)(en kJ/m²-jour)

kJ/m2-jour	1977	1979	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Moy. 77-92	2002
janv	19020	18930	19841	18930	18890	17720	19440	18790	19490	10980	18203	17182
fev	22391	22100	23180	23410	19610	20340	23670	22067	23070	17640	21748	16681
mars	25300	24397	28390	24030	21760	20541	26960	25946	27440	21030	24579	20832
avril	24730	26040	26520	25960	24441	23990	26840	27630	27351	19990	25349	21694
mai	23650	27030	27840	22620	25460	23800	27960	26620	26040	19030	25005	22284
juin	24870	27660	26830	22910	25120	25150	25190	28091	25051	20210	25108	18479
juillet	29960	25940	24510	24710	22310	24960	28160	26221	28361	22800	25793	16883
aout	26070	25560	27111	25810	27490	24960	27636	28741	27530	23140	22556	17759
sept	26390	21580	23480	22890	22160	23250	23984	22790	21060	17980	22556	14278
oct	20490	24220	21000	18740	23670	20820	23860	21020	17851	18220	20989	15632
nov	18700	19530	19900	17720	18530	22110	20220	21140	15480	16520	18985	-
dec	17860	17421	16700	16900	15320	16930	17241	20420	1293	15980	15607	-

Malgré tout, la productivité obtenue ici dépasse les résultats de Malik et al. (1982) obtenus en Jordanie, et de Tiwari (2002) et Akash et al. (2000) obtenus en Inde.

5.1.2 Canal semi-fermé

Ce deuxième prototype comportait un couvercle troué sur le canal d'eau usée dans le but d'élever la température de l'eau de façon importante à l'intérieur du canal, et ainsi augmenter le taux d'évaporation. De l'isolation de poly-uréthane a été apposée sur l'extérieur des réflecteurs pour contenir les pertes de chaleur par les réflecteurs notées lors des premiers essais.

Les essais ont montré (voir figure 4.9) que la température maximum de l'eau usée a augmenté de manière importante, jusqu'à 90°C, mais que le volume d'eau distillée récupérée n'augmente pas au même rythme. De plus, seulement 1.5 litres d'eau distillée ont pu être récupérés durant la journée d'essai, où existaient des conditions climatiques optimales. L'humidité relative à l'intérieur du canal s'est élevée à plus de 95%, ce qui signifie une forte évaporation de l'eau qui crée un environnement presque saturé. Cependant, cet environnement saturé n'était pas propice à la poursuite d'une forte évaporation; moins de 8 litres d'eau se sont évaporés du canal d'eau usée au cours de la journée.

Par la faible humidité relative à l'extérieur du canal et le faible volume d'eau condensée récupérée, il semble que les vapeurs d'eau ne sortaient que très peu par les trous du couvercle du canal, même si l'espace à l'intérieur du canal était saturé et très chaud. De plus, l'air à l'extérieur du canal n'était pas saturé en vapeurs, ce qui n'aidait pas au phénomène de condensation des vapeurs présentes dans cet espace. La littérature montrait cependant qu'un couvercle troué n'affectait pas l'évaporation vers l'extérieur d'un milieu semi-fermé. Valsaraj (2002) a posé une feuille d'aluminium perforée à la surface de l'eau pour augmenter la température des molécules d'eau de surface. Aucun

problème d'évaporation n'a été mentionné et sa productivité s'est trouvée améliorée.

L'environnement saturé d'eau à l'intérieur du canal de notre prototype montre donc un plus fort niveau d'évaporation par ce canal que le canal ouvert, mais il restait encore à trouver une façon d'améliorer la condensation de ces vapeurs pour poursuivre l'évaporation et récupérer l'eau purifiée.

5.1.3 Concentrateur avec condensateur externe

Par l'entrée en scène d'un condensateur externe, les deux processus physiques d'évaporation et de condensation avaient maintenant lieu dans deux appareils distincts et chacun des deux processus pouvaient être mieux contrôlés séparément.

Ce condensateur comportait le sseau de 19 litres et 1.5 m de tube de plastique flexible de 1 pouce de diamètre (paroi de 3 mm) en forme de serpentín descendant fixé sur la paroi du sseau. Le sseau était rempli d'eau fraîche à 20°C pour refroidir le tube. Dans un système de circulation fermé, le ventilateur poussait de l'air à l'extérieur du canal pour la forcer à entrer dans le canal par les trous du couvercle et ressortir du canal vers le condensateur pour être finalement ré-aspiré par le ventilateur. Un schéma du système de circulation d'air est montré à la figure 4.5.

Les résultats détaillés sont présentés à la figure 4.10. La température de l'eau usée dans le canal s'est stabilisée à 75°C dès 12h00, avec une humidité relative de 85 % et 12 litres d'eau évaporée du canal d'eau usée pour la journée. Des gouttes se formaient sur les parois du tube du condensateur, descendant par gravité jusqu'à la bouteille de condensation. La production d'eau distillée quotidienne fut de 2.6 litres. Pour le même canal, la température et l'humidité relative se sont stabilisés à un niveau plus bas que le prototype sans le système de circulation d'air. L'ajout du système de circulation d'air

vers le condensateur a aussi augmenté la quantité d'eau évaporée du canal qui est passée de 8 à 12 litres. Le niveau d'évaporation a donc augmenté avec l'ajout du système de circulation d'air. En réduisant l'humidité relative dans le canal et en maintenant une circulation d'air au-dessus de la surface de l'eau, des facteurs favorables à l'évaporation ont été créés.

Malgré la grande quantité d'eau évaporée, le nouveau condensateur n'a pu condenser adéquatement les vapeurs d'eau. Ce faible taux de condensation était dû à plusieurs facteurs. Premièrement, l'eau du condensateur se réchauffait rapidement par la chaleur provenant du tube rempli de vapeurs chaudes, souvent jusqu'à 50°C. Le réchauffement de l'eau diminuait de beaucoup l'efficacité du condensateur et de l'eau froide devait constamment être ajoutée pour baisser la température de l'eau. Deuxièmement, les parois du tube de plastique étaient très épaisses et en plastique, donc pas très efficaces pour l'échange de chaleur. De plus, le tube était très court et un faible pourcentage de vapeurs arrivait à se refroidir suffisamment pour se condenser durant le parcours à l'intérieur du condensateur.

Un autre condensateur devait donc être construit : plus grand pour une meilleure absorption de chaleur, un tube plus long et des parois plus fines. Aussi, il a été considéré que l'air qui entrait dans le condensateur n'était pas saturé en vapeur à cause de la configuration du système de circulation d'air qui passe par l'extérieur du canal semi-fermé. Un changement de configuration était donc de mise.

5.1.4 Condensateur externe 2

À ce point, il a semblé logique que la circulation d'air ne devait pas passer par l'extérieur du canal. Une circulation par un canal fermé envoyait au condensateur de l'air complètement saturé en vapeurs et le faible ventilateur était plus efficace à circuler les vapeurs recherchées dans ce système plus restreint et direct entre le canal

d'évaporation et le condensateur. Le condensateur a aussi été modifié. Un contenant d'une capacité de 100 litres et un tube plus fin ($\frac{1}{4}$ pouce de diamètre) et plus long (12m) ont été utilisés. Le serpentin a été enroulé autour d'une structure de maille au centre du contenant pour un meilleur contact avec l'eau de refroidissement.

Les essais ont permis d'augmenter l'humidité relative à près de 100% dès 11h00 à l'intérieur du canal, ce qui signifie que le ventilateur poussait de l'air saturé de vapeurs vers le condensateur. La température de l'eau usée s'est maintenue à plus de 90°C entre 12h00 et 15h00. Cette forte capacité d'évaporation s'est démontrée lors d'un essai d'évaporation à système ouvert; avec le ventilateur en marche et le condensateur déconnecté (extrémité du canal ouverte vers l'extérieur), plus de 20 litres d'eau ont été évaporés et rejetés à l'extérieur de l'appareil. Cette capacité d'évaporation est la meilleure obtenue lors des essais et ce prototype d'évaporateur peut être considéré comme optimisé. Cependant, la condensation de cette grande quantité de vapeurs n'a pas réussi. Il semble que la circulation de vapeurs du canal dans le condensateur n'a pu être établie. Très peu de gouttes de vapeurs condensées se formaient dans le tube de plastique transparent et moins de 200ml d'eau a été distillée. Le canal demeurait un environnement saturé, sans évacuation des vapeurs. L'eau de refroidissement du condensateur s'est maintenue à une température beaucoup plus fraîche que dans le contenant de 19l. L'eau s'est échauffée avec le transfert de chaleur du tube, mais pas à plus de 35°C durant la journée. La faible quantité de vapeurs présentes dans le tube du condensateur, ainsi que la plus grande capacité d'absorption des 100 l d'eau de refroidissement expliquent ce faible réchauffement.

La fermeture du canal apportait un air plus humide au condensateur, pour une évaporation globale beaucoup plus importante. C'est ce qu'ont démontré les essais à système ouvert. Cependant, il semblerait que le ventilateur était trop faible pour projeter l'air dans ce tube trop long et trop fin, même avec un système en boucle. Dans le but de réduire cette pression, la longueur du tube a par la suite été réduite graduellement

jusqu'à 5 mètres (réduction de 66%), mais encore une fois, sans succès. Le tube était trop fin et la pression provoquée par ce venturi réduisait la puissance du moteur du ventilateur.

5.1.5 Condensateur externe 3

Pour ce dernier prototype, l'évaporateur optimisé a été conservé. Par la suite des essais avec les condensateurs 1 et 2, il a été conclu qu'un tube de dimensions moyennes était nécessaire pour provoquer la circulation des vapeurs, dans le but de les condenser. 7 mètres de tube de ½ pouce de diamètre ont donc été apposés sur la structure de maille au centre du contenant de 100 litres. Pour obtenir une meilleure succion des vapeurs directement dans le condensateur, donc une meilleure utilisation de sa puissance, le ventilateur a aussi été déplacé juste après le condensateur pour réellement succionner les vapeurs de l'évaporateur vers le condensateur. L'emplacement après-condensateur évite aussi d'endommager le moteur du ventilateur par l'humidité car les vapeurs sont théoriquement condensées par le condensateur. La nouvelle configuration est montrée à la figure 4.7.

Les essais ont démontré la même forte capacité d'évaporation avec un environnement saturé de vapeurs et une haute température de l'eau usée - près de 90°C - durant les heures de plus fortes radiations solaires. Les modifications apportées au condensateur et le nouvel emplacement du ventilateur ont permis de créer la circulation de vapeurs recherchée car de la vapeur et des gouttes étaient visibles à l'intérieur du tube transparent. Cependant, seulement de faibles quantités d'eau distillée ont pu être récupérées au cours de la journée : moins de 2 litres.

Par le nouvel emplacement du ventilateur, la succion de l'air du canal vers le condensateur se voulait plus directe et efficace, car le ventilateur était maintenant situé plus près de la zone de circulation prioritaire, le parcours entre l'évaporateur et le

condensateur. Des gouttes d'eau condensées semblent avoir bloqué la circulation d'air dans le tube du condensateur, une fois leur descente amorcée. Le tube de plastique était flexible et léger et il était difficile de le fixer parfaitement pour maintenir une descente continue, ce qui aurait garanti la descente gravitaire des gouttes formées, sans blocage du système. La dimension du tube utilisée semblait toutefois adéquate pour provoquer la condensation recherchée. Dès que le tube était remué et remplacé pour laisser descendre les gouttes immobilisées, le tube entier se remplissait de nouveau de vapeurs. La structure descendante du tube semble avoir été le problème principal. Étant flexible et mou, le plastique ne pouvait être fixé en un serpentín tout à fait stable et continuellement descendant. De plus, le plastique, quel que soit le type, n'est pas un très bon conducteur de chaleur. Des métaux sont habituellement utilisés dans les échangeurs de chaleur pour leurs propriétés thermiques, ainsi que leur stabilité et rigidité. Dans le cas de la présente expérience, l'appareillage et la main d'œuvre nécessaire au travail du cuivre n'étaient pas disponible pour des projets de particuliers.

5.1.6 Unité de distillation théorique

Cette unité de distillation a été conçue théoriquement pour combler la lacune de condensation présente chez les prototypes testés. Selon la théorie des échangeurs de chaleurs, ce condensateur, connecté à l'évaporateur optimisé pourrait condenser jusqu'à 17 kg eau par jour, ce qui dépasse amplement les autres modèles de distillateurs solaires simples dont la productivité a fait l'objet de publications scientifiques. Quoique pour le moment théorique, ce distillateur reste facile d'utilisation et est parfaitement adapté au contexte industriel mexicain précaire. Seule l'opération d'une pompe de faible débit se rajoute au fonctionnement des distillateurs testés. La combinaison du condensateur théorique et de l'évaporateur optimisé est de loin la meilleure option pour la distillation de l'eau usée de la tannerie.

5.2 Avancées en évaporation et en condensation

L'objectif du projet était de récupérer de l'eau distillée par un procédé d'évaporation suivi d'un procédé de condensation. L'appareil devait utiliser seulement de l'énergie solaire, des procédés mécaniques simples et du matériel de faible coût. Les résultats des essais peuvent être analysés sous deux grandes facettes distinctes. Les résultats d'évaporation et ceux de condensation ont chacun été optimisés, pour obtenir la plus grande capacité de distillation possible. Les facteurs physiques de l'efficacité des deux procédés ont été étudiés et ces connaissances ont été appliquées pour développer un concentrateur d'énergie solaire qui a permis d'optimiser le chauffage et l'évaporation de l'eau, en plus d'expérimenter plusieurs façons de condenser les vapeurs produites.

5.2.1 *Évaporation*

Les réflecteurs semi-cylindriques ont pu concentrer l'énergie solaire pour augmenter la température de l'eau à des niveaux jamais obtenus avec des évaporateurs traditionnels. Avec les canaux semi-fermé et fermé, et les réflecteurs bien isolés, la température de l'eau atteignait 90°C. De plus, 20 litres d'eau par jour ont pu être évaporés avec le canal fermé et un ventilateur ouvert (non connecté au système de circulation).

La température de l'eau est un des principaux facteurs de la quantité d'eau évaporée. L'autre facteur principal qui aide à l'évaporation est la surface de contact entre l'eau et l'air. L'évaporation est différente de l'ébullition, qui se passe dans toute la masse de l'eau. L'évaporation est un phénomène de surface; seules les molécules de surface interagissent avec l'air et s'évaporent selon la température de l'eau, le niveau d'humidité de l'air et l'énergie cinétique à la surface de l'eau.

Pour cette raison, le prochain canal pourrait être un peu plus large, pour favoriser

une plus grande surface de contact entre l'eau et l'air ambiant, mais sans toutefois offrir une trop grande surface d'ombre sur les réflecteurs. Les dimensions des canaux utilisés n'ont pas été changées au cours des expériences pour se conformer aux trous originaux des vitres latérales. Nous pouvons donc conclure que la capacité d'évaporation de l'appareil a augmenté de manière importante durant ce projet. Les détails suivants pourraient toujours améliorer la capacité d'évaporation de l'appareil :

- Des réflecteurs avec plus grande réflectivité;
- Un canal de métal noir meilleur conducteur de chaleur qu'un canal peint;
- Un canal plus large;
- De l'isolant de qualité sur les réflecteurs, meilleurs joints aux unions et double vitre.

5.2.2 *Condensation*

Durant ce projet, des vapeurs d'eau ont pu être condensées de deux façons : sur la vitre plus fraîche à cause du contact avec l'air extérieur, et avec un condensateur externe. Les premiers essais de condensation sur la vitre correspondaient aux méthodes des distillateurs traditionnels. Jusqu'à 6 litres d'eau par jour ont pu être condensés de cette façon. La condensation sur vitre pourrait être améliorée en augmentant la température et l'humidité relative de l'air ambiant à la vitre. La condensation pourrait aussi être améliorée en refroidissant la vitre, mais sans bloquer les rayons solaires et sans refroidir l'environnement d'évaporation, ce qui serait une perte d'efficacité pour l'évaporation.

Le second procédé de condensation investigué fut par l'usage d'un condensateur externe, ce qui permet de mieux contrôler les deux procédés d'évaporation et de condensation séparément. Avec un ventilateur, un circuit de circulation d'air a été formé pour succionner les vapeurs jusqu'à un condensateur et re-circuler les vapeurs non-condensées de retour vers l'évaporateur.

Durant les essais effectués avec le condensateur construit, il a été mis au clair qu'un condensateur fonctionnel requiert de la précision et les matériaux adéquats. Il a été difficile d'obtenir des résultats satisfaisants avec du matériel peu cher et une construction maison. Cependant, il a été éclairci que les facteurs régissant la condensation sont les suivants : un environnement refroidissant froid et de grande capacité thermique, des tubes de haute conduction de chaleur et une structure fixe de tubes qui laisse descendre l'eau distillée par gravité sans bloquer la circulation de l'air.

Le condensateur échangeur de chaleur à double tuyau conçu théoriquement combine ces conditions gagnantes. La théorie des échangeurs de chaleur a été éprouvée maintes fois et le modèle simple de condensateur choisi, si bien construit et bien isolé, devrait atteindre une condensation aussi efficace que la prédiction calculée.

5.3 Application du système pour les tanneries

Les essais sur les prototypes ont permis d'optimiser la capacité d'évaporation et de condensation du distillateur. Le potentiel d'utilisation du prototype optimisé pour la tannerie Migara peut alors être tracé. La tannerie dispose d'un toit de 15 m par 15 m pouvant contenir 60 appareils. Si chacun des appareils distille 17 kg d'eau par jour, 1020 kg d'eau distillée par jour pourraient être produits et réutilisés dans le procédé, ce qui équivaut à 5 % de leur consommation quotidienne d'eau propre. Les boues ne seraient pas rejetées dans l'égout municipal, mais traitées comme des solides, de la même façon que les boues des stations d'épuration. Une déshydratation par évaporation solaire est possible, pour un traitement à sec, de même que l'enfouissement direct.

5.3.1 Application à moyenne ou grande échelle

La distillation solaire reste un système d'appoint pour le traitement des eaux usées. Son efficacité restera toujours fonction des conditions météorologiques et sera

toujours plus faible que les traitements biologiques et physico-chimiques. Cependant, grâce à son faible coût d'utilisation, la distillation pourrait être utilisée à moyenne échelle sur les toits ou les terrains des tanneurs.

L'application à moyenne échelle de la distillation s'effectuerait à l'aide de dizaines d'appareils identiques aux prototypes testés. La productivité mentionnée a été obtenue lors de tests réalisés par lot (batch). Une configuration en parallèle apporterait à tous les appareils la même quantité et le même type d'eau usée. Une productivité similaire devrait donc être obtenue. Une configuration en continu devrait faire l'objet de nouveaux tests car la circulation constante de nouvelle eau usée dans les évaporateurs risque de faire chuter la haute température nécessaire à l'obtention d'un haut taux d'évaporation. Pour minimiser l'utilisation de pompes, la configuration des appareils devrait prévoir un maximum de circulation gravitaire de l'eau entre les appareils.

Plusieurs avantages et inconvénients se présentent, tant pour l'utilisation de la distillation sur toit que sur un terrain. L'installation d'une grande quantité d'appareils sur un toit implique une vérification de la capacité portante du toit et un renforcement au besoin. Maintenir l'appareillage sur un espace à accès restreint comme les toits aiderait aussi à sécuriser les sites, mieux protéger le matériel, diminuer le vandalisme et le risque d'accidents. Les désavantages de l'utilisation sur les toits seraient la capacité de traitement limitée par la superficie du toit et la nécessité d'utilisation d'une pompe ou un monte-charge pour transporter l'eau à traiter (et l'eau de refroidissement) vers le toit.

Les appareils de distillation pourraient aussi être installés sur un terrain adjacent à la tannerie. Cette option permettrait une plus grande capacité de traitement, jusqu'à traiter l'eau usée de plusieurs tanneries qui sont souvent situées à proximité les unes des autres. Pour plusieurs tanneries situées en zone périphériques du centre-ville, des terrains adjacents sont disponibles et abordables. Des structures de sécurité doivent être ajoutées

au terrain pour restreindre l'accès au site, car il est plus susceptible d'être victimes de vandales ou de voleurs de matériel. Une pompe sera tout de même nécessaire pour le transport des eaux usées car les réservoirs de la tannerie se situent au niveau des égouts.

5.3.2 Implications pour la consommation d'eau propre

L'eau distillée provenant des eaux usées pourra être directement réutilisée dans le procédé de tannage. L'achat et la consommation d'eau propre dans le procédé diminueront donc également à la quantité d'eau distillée par le système et réutilisée dans le procédé de tannage.

5.3.3 Implications pour la contamination environnementale

La distillation permettra de concentrer et soutirer les contaminants du réseau d'eau usée en les traitant comme résidus solides secs. Ce traitement, même utilisé en traitement d'appoint, pourrait permettre de diminuer le rejet de sels et autres contaminants dangereux dans les aquifères.

La station biologique municipale de León ne permet pas de traiter les sels contenus dans l'eau usée, qui se retrouvent donc intégralement dans les aquifères. Un pré-traitement des effluents salés, comme ceux de rinçage, par distillation solaire permettrait de retirer le sel du rejet à l'égout en le séparant du concentrat et en le réutilisant dans le procédé.

Le traitement prioritaire des effluents moins chargés comme les eaux de rinçage et les eaux de dessalement peut aider à concentrer l'effluent, ce qui peut améliorer l'efficacité de la station d'épuration municipale biologique qui est de type boues activées.

Plusieurs traitements sont envisagés pour les boues et les résidus solides. Les boues produites sont présentement rejetées au parc de boues, une décharge à ciel ouvert

qui recueille les boues de la majorité des tanneries. Ce parc ne possède pas de structure de récupération de lixiviat. Une quantité importante de contaminants se retrouvent donc dans le sol et les aquifères. La municipalité envisage de forcer les tanneurs à déménager leurs rejets de boues vers un terrain constitué de structure de récupération de lixiviat, qui pourraient être traité de façon indépendante, par distillation ou autre traitement chimique.

L'évaporation solaire pourrait permettre de déshydrater complètement les boues avant leur rejet au parc. De simples bassins ouverts et une structure de récupération du lixiviat sont nécessaires et peuvent être construits à la tannerie. Cette déshydratation des résidus sur place réduirait le poids des résidus à transporter et du même fait, le coût de transport et de traitement de façon importante. Des tests doivent par contre être effectués pour vérifier la présence de gaz ou d'odeurs néfastes lors de l'évaporation à ciel ouvert.

Le compostage des résidus solides a été envisagé par plusieurs spécialistes et les tanneurs mexicains s'intéressent de plus en plus à cette alternative. Selon les études, les résidus de tanneries, grâce à leur haute teneur en matière organique, produit un excellent amendement de sol. Cependant, sa teneur en chrome, quoique infiniment réduite en comparaison avec celle des boues fraîches, limite son usage à l'agriculture ornementale, à la production agricole non destinée à la consommation et au reboisement, très en demande au Mexique. En Écosse (Sheppard et al. 2000) et au Royaume-Uni (Heyworth, 2000), des résidus solides de tannerie sont déjà compostés par d'impressionnantes infrastructures industrielles. En Europe, les coûts reliés à l'enfouissement ont augmenté de façon importante, ce qui rend compétitive l'option du compostage, malgré les coûts d'opération. Le *Programme régional de l'UNIDO sur le contrôle de la pollution de l'industrie du tannage en Asie du sud-est* a fait des essais de compost par piles avec des résidus de tanneries traditionnelles de l'état de Tamilnadu, en Inde. (UNIDO, 2001) Les résultats de ces essais sont encourageants pour les tanneurs mexicains car les chercheurs

indiens ont obtenu un compost de bonne qualité avec des résidus de tannerie aux procédés de tannage similaires aux leurs.

La distillation solaire reste une solution de décontamination à la fin du procédé, du type « bout de tuyau ». Une diminution de la quantité d'eau utilisée dans le procédé serait une méthode plus efficace pour diminuer la consommation d'eau et la production d'eau usée. Cependant, les méthodes suggérées sont présentement trop coûteuses ou trop risquées sur la qualité du produit. Les tanneurs mexicains craignent la compétition commerciale des asiatiques et préfèrent pour le moment conserver leurs méthodes plus économiques et sûres. Même si la résolution du problème de contamination à la source serait plus efficace à long-terme pour diminuer la contamination des eaux de tanneries, la décontamination des effluents à la sortie de l'usine est plus réaliste à court-terme. Cette optique peut inclure une réutilisation des déchets produits dans l'axe de l'écologie industrielle, en plus du développement d'outils utilisant les principes de développement durable.

5.4 Autres applications

La distillation solaire pourrait aussi être appliquée pour le traitement d'autres types d'eaux usées industrielles. Jhorar et Malik (1993) ont comparé le potentiel d'évaporation à l'air libre de différentes eaux industrielles et ont trouvé une évaporation similaire à celle de l'eau. Les principaux facteurs limitatifs étaient la présence de graisses qui ralentissaient l'évaporation et la présence de composés organiques volatils qui s'évaporaient avec l'eau. La distillation serait donc appropriée pour beaucoup d'eaux industrielles. Une décantation préalable permet de diminuer la concentration de matières en suspension et diminue la turbidité de l'eau. Une eau très chargée signifie simplement un plus grand entretien et nettoyage des appareils de distillation. Pour tous les types d'industries, la distillation reste une solution plus efficace pour les eaux moins chargées en contaminants, comme les eaux de rinçage.

Ce distillateur solaire pouvant produire jusqu'à 17 litres d'eau distillée par appareil par jour est une excellente option pour la production d'eau potable à partir d'eau salée dans les communautés où l'eau douce se fait plus rare. Le coût de production est presque nul et l'utilisation de l'énergie solaire en fait une solution pour les régions éloignées, ou à faible densité de population. L'apport solaire nécessaire au traitement est en fait disponible dans la plupart des pays en voie de développement car une grande majorité sont situés à une faible latitude, près de l'équateur. La distillation retire, en une étape, tous les produits dissous. Une simple désinfection est ensuite préférable pour la consommation de l'eau lorsque de l'eau salée propre est utilisée.

Presque toutes les publications sur les distillateurs solaires mentionnées dans ce mémoire ont pour but la production d'eau potable. Cette eau d'excellente qualité a une plus grande valeur marchande que l'eau de procédé industriel et jouit d'une très haute demande sur le marché mexicain et latino-américain, l'eau distribuée gratuitement n'étant plus considérée comme potable. Le distillateur solaire testé ici pourrait produire jusqu'à 17 litres d'eau par jour pour une surface de $1,93 \text{ m}^2$, donc une production de $8,8 \text{ litres/m}^2\text{-jour}$. L'un des meilleurs résultats publiés, ceux de Sharma et Mullick (1993), étaient de $2,17 \text{ litres/m}^2\text{-jour}$ à $4 \text{ litres/m}^2\text{-jour}$. Le distillateur serait donc un des plus efficace sur le marché pour un appareil solaire et simple.

6. Conclusion

Ce projet se voulait la recherche d'une solution réaliste à un problème de contamination industrielle complexe dans un pays en développement. Les tanneries produisent un effluent très chargé en matière organique, en acides, sels et matières en suspension. La distillation solaire offrait un traitement en une étape simple pour la purification de l'eau. De plus cette technologie est simple de fonctionnement et d'entretien, elle est économique à l'achat et utilise de l'énergie gratuite et renouvelable. L'utilisation de l'énergie solaire est en effet l'idée principale du projet au Mexique où l'énergie solaire est très abondante, mais pas encore exploitée suffisamment.

Cinq prototypes de distillateurs ont donc été construits et testés pour optimiser leur capacité d'évaporation et de condensation. Tous utilisaient un réflecteur demi-cylindrique qui concentraient les rayons solaires sur le canal d'eau usée situé au point focal. Les deux premiers prototypes effectuaient la condensation sur la vitre en angle, tandis que les trois derniers circulaient leurs vapeurs jusqu'à un condensateur externe.

Les essais ont démontré que l'utilisation d'un condensateur externe permet de mieux contrôler les deux processus d'évaporation et de condensation. Avec un canal fermé et une circulation d'air, le taux d'évaporation a été optimisé à 20 litres/jour, ce qui représente le plus haut taux d'évaporation atteint par un distillateur solaire au monde. Les condensateurs construits avec les matériaux facilement disponibles n'ont pas pu condenser efficacement les vapeurs produites. Un condensateur simple de type échangeur de chaleur a par la suite été conçu théoriquement dans le but d'atteindre la condensation recherchée. Ce condensateur théorique devrait atteindre une condensation de 17 litres/jour, ce qui, pour un évaporateur de $1,93 \text{ m}^2$, signifierait une capacité de distillation de $8,8 \text{ litres/m}^2\text{-jour}$. Ce distillateur serait un des distillateurs solaires les plus performants sur le marché. De plus, il est totalement adapté au contexte industriel

mexicain précaire, tant pour le traitement des eaux usées industrielles que pour la production d'eau potable.

Les technologies solaires restent toutefois des technologies moins efficaces que les technologies de pointe comme les traitements biologiques ou physico-chimiques. L'apport d'énergie est difficile à contrôler, et les appareils nécessitent un soin constant et un entretien plus régulier. Les industriels mexicains sont prêts à faire face à ces lacunes pour utiliser une technologie moins coûteuse. Les tâches d'entretien sont simples et peuvent être exécutées par leurs ouvriers. Les prototypes testés sont de grandeur nature, donc prêts à être utilisés en parallèle pour le traitement par lot. Des essais de traitement à grande échelle devront être effectués pour déterminer la possibilité de commercialisation du système.

Plusieurs tanneurs de León ont démontré un intérêt pour les résultats du projet de recherche et prévoient se doter d'un système de traitement dès que la municipalité mettrait à exécution ses menaces d'imposition d'amendes à la contamination, même s'ils considèrent ne pas en avoir les moyens à moyen-terme.

Les technologies utilisant les énergies renouvelables, quoique moins efficaces que les hautes technologies, pourraient être une solution à ces problèmes de pollution de l'eau des pays en voie de développement. En les combinant avec des procédés industriels améliorés et une utilisation raisonnable des ressources, les industries travaillent pour un développement durable.

Références

- ABU-QUDAIS M., B.A/K. ABU-HDLEH et O.N. OTHMAN. (1996). Experimental study and numerical simulation of a solar still using an external condenser. Energy. 21 (10): 851-855.
- AKASH B.A., MOHSEN, M.S. et NAYFEH, W. (2000). Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. Energy Conversion and Management. 40 (9): 883-890.
- ALI H. (1991). Experimental study on air motion effect inside the solar still ont still performance. Energy Conversion & Management. (32) : 67-70.
- ATES E., D. ORTON et O. TÜNAY. (1997). Characterization of tannery wastewaters for pretreatment- selected case studies. Water Science Technology. 36 (2-3): 217-223.
- BADRAN A.A. (2001). Inverted trickle solar still: effect of heat recovery. Desalination. 133: 167-173.
- BLANCO J., S. MALATO, P. FERNANDEZ, A. VIDAL, A. MORALES, P. TRINICADO, J.C. OLIVEIRA, C. MINERO, M. MUSCI, C. CASALLE, M. BRUNOTTE, S. TRATZKY, N. DISHINGER, K.H. FUNKEN, C. SATTLER, M. VINCENT, M. COLLARES-PERREIRA, J.F. MENDES et C.M. RANGEL. (1999). Coumpound Parabolic concentrator technology development to commercial solar detoxification applications. Solar Energy. 67 (4-6): 317-330.
- BLOEMER, J.W., R.A. COLLIN et J.A. EIBLING. 1961. Study and field evaluation of solar sea-water still. Report no. 50, Office of Saline Water, Battelle Memorial Institue, Columbus, Ohio.
- COOPER P.I. (1969). Digital Simulation of Transient Solar Still Processes. Solar Energy. 12: 313.
- DE PAUL I. (2002). New Model of Bassin Type Solar Still. Journal of Solar Energy Engineering. 124: 311-314.
- DUFFIE J.A. et W.A. BECKMAN. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 917 pp.

- DUNKLE R.V. (1961). Solar Water Distillation, The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still. International Developments in Heat Transfer, A.S.M.E., *Proc. International Heat Transfer, Part V*. University of Colorado, 895.
- EAMES P.C., B. NORTON et A.F. KOTHDIWALA. (1996). The State of Art in modelling line-axis concentrating solar energy collectors. Renewable Energy. 9 (1-4): 583-588.
- EDWARDS J.D. (1995). Industrial wastewater treatment: a guidebook. CRC Press. Boca Raton, USA. 170 pp.
- EL-BAHI A. et D.A. INAN. (1999). A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser. Desalination. 123 (1): 79-83.
- EL HERALDO. (1999) Article sur les négociations entre les tanneurs et SAPAL. El Heraldo. Quotidien de León. Janvier 1999, page 1.
- FARID M. et A.W. AL-HAJAJ. (1996). Solar desalination with a humidification-dehumidification cycle. Desalination. 106 : 427-429.
- FATH H.E.S. et H.M. HOSNY. (2002). Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser. Desalination. 142 (1): 19-27.
- GARCIA-RODRIGUEZ L. et C. GOMEZ-CAMACHO. (1999a) Design parameter selection for a distillation system coupled to a solar parabolic trough collector. Desalination. 122: 195-204.
- GARCIA-RODRIGUEZ L., A.I. PALMERO-MERRERO et C. GOMEZ-CAMACHO (1999b) Application of direct steam generation into a solar parabolic trough collector to multieffect distillation. Desalination. 125: 139-145.
- HARALAMBOPOULOS D.A., G. BISKOS, C. HALVADAKIS et T.D. LEKKAS. (2002) Dewatering of wastewater sludge through a solar still. Renewable Energy. 26: 247-256.
- HARDING J. (1883) Apparatus for solar distillation. Proc. Institute of Civil Engineers. 73: 284.
- HEYWORTH A. (2000) Industrial composting of solid organic wastes. World Leather. November 2000.
- I.E.E.G.: INSTITUTO ESTATAL DE ECOLOGIA. (1998) Recensement environnemental 1998. Instituto estatal de ecología.

- I.N.E.G.I. (1994) Institut national de statistiques. Recensement national.
- INSTITUTO NACIONAL de ECOLOGIA. (1999). Manual de pocedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduria. Instituto Nacional de Ecologia. D.F. Mexico. 63pp.
- INSTITUTO NACIONAL DE GEOFISICA. [En ligne] Mexico, Distrito Federal.
<http://www.igeofcu.unam.mx/> (Page consultée en mai 2003)
- INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY (ISES). (2001). Solar Energy, The State of Art. Edited by Jeffrey Gordon. James & James Publishers, London, UK. 706pp.
- JHORAR B.S. et R.S. MALIK. (1993). Evaporation behaviour of different organic effluents from open surfaces. Environmental Pollution. 80: 53-56.
- KHALIFA A.-J.N., A.S. AL-JUBORI et M.K. ABED. (1999). An experimental study on modified simple solar stills. Energy Conversion & Management. 40: 1835-1847.
- KALOGIROU S., S. LLOYD et J. WARD. (1997). Modelling, optimisation and performance evaluation of a parabolic trough solar collector steam generation system. Solar Energy. 60 (1): 49-59.
- KOTHDIWALA A.F., P.C. EAMES et B. NORTON. (1996). Optical performance of an asymetric inverted absorber compound parabolic concentrating solar collector. Renewable Energy. 9 (1-4): 576-579.
- KUMAR S., TIWARI G.N. et SINGH H.N. (2000). Annual performance of an active solar distillation system. Desalination. Vol. 5. Iss. 1. pp.79-88.
- KWATRA H.S. (1996). Performance of a solar still: Predicted effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature. Solar Energy. Vol. 56, No. 3, pp 261-266.
- LEONHARD K., P. EISNER, W. HAASE et P. WILDERER. (1994). Distillative treatment of liquid industrial wastes. Water Science Technology. 30(3): 139-147.
- LÖF G.O.G., J.A. EILBING et J.W. BLOEMER. (1961). Energy balance in solar distillation. Am. Inst. Chem. Engrs. 7 : 641.
- MALIK M.A.S., G.N. TIWARI, A. KUMAR et M.S. SODHA. (1982). Solar distillation. Pergamon press. Oxford, England. 175 pp.

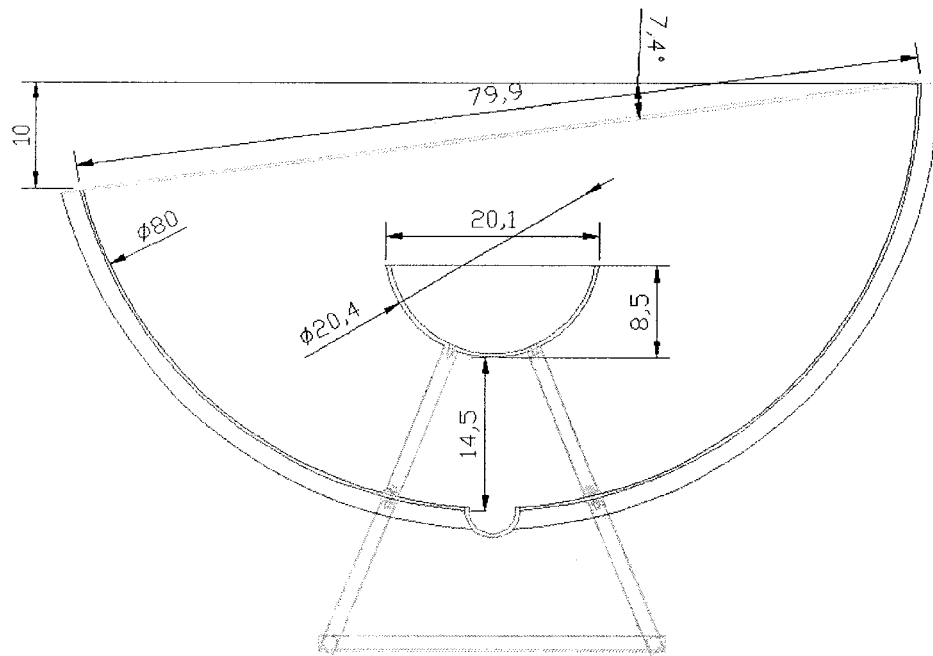
- MATSUMOTO Y., A. URBANO, A.M. MARTINEZ et R. ASOMOZA. (1994). Renewable energy applications progress in Mexico. Renewable Energy. 5 (1-4): 945.
- McKEOUGH P. et L. FAGERNÄS. (1999). Further evaporation and final treatment of process-water concentrates. Water Science Technology. 40(11-12): 25-32.
- MINASIAN A.N., A.A. AL-KARAGHOULI et S.K. HABEEB. (1997). Utilization of a cylindrical parabolic reflector for desalination of saline water. Energy Conversion and Management. 38 (7): 701-704.
- MORAN M.J. et H.N. SHAPIRO. (1995). Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 3rd Ed. John Wiley & Sons, New York.
- PRESIDENCIA MUNICIPAL, LEON, GUANAJUATO. (1998). Reglamento de Uso de la Red de Alcantarillado del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León, Gto. 3 de Febrero de 1998. Año LXXXIV, Tomo CXXXV. Secretaria de Gobierno. León, Guanajuato, Estados Unidos Mexicanos. (Aussi disponible en ligne en date de mai 2003)
- RAI C.L., I. DEVOTTA et P.G. RAO. (2000). Aspects of enhancement and retardation of evaporation rate of soak liquor in tannery solar pans. Journal of American Leather Chemists Association. 95: 319-323.
- RAMIREZ A.M., P.J. SEBASTIAN, S.A. GAMBOA, M.A. RIVERA, O. CUERVAS et J. CAMPOS. (2000). A documented analysis of renewable energy related research and development in Mexico. International Journal of Hydrogen Energy. 25: 267-271.
- RICHTER J.L. (1996). Optics of a two-trough solar concentrator. Solar Energy. 56 (2): 191-198.
- SARTORI E. (1996). Solar still versus solar evaporator: A comparative study between their thermal behaviors. Solar Energy. 56 (2):199-201.
- SEARS F.W. et G.L. SALINGER. (1986). Thermodynamics, Kinetic Theory and statistical Thermodynamics. 3rd Ed., 16th printing, Addison Wesley, Reading Massachusetts.
- SHARMA V., MULLICK S. (1993). Calculation of hourly output of a solar still. ASME J Solar Energy Eng.115: 231-237.
- SHEPPARD A. and GILMOUR H. Composting - a natural alternative to landfill disposal of tannery waste. World Leather. November 2000.

- SHERWOOD T.K. et R.L. PIGFORD. (1952). Absorption and extraction. McGraw Hill, New York.
- SONG Z., C.J. WILLIAMS et R.G.J. EDYVEAN. (2000). Sedimentation of tannery wastewater. Water Research. 34 (7) : 2171-2176.
- SRINIVASA KANNAN C. et P.G. RAO. (2000). A study of solar evaporation pans. Indian Journal of Chemical Technology. 7: 326-331.
- SUNEJA, S. et TIWARI G.N. (1997). Performance evaluation of an inverted absorber solar still. Energy Conversion and Management. 39 (3/4):173.
- SUNEJA S. et TIWARI G.N. (1999). Effect of water flow on internal heat transfer solar distillation. Energy Conversion and Management. 40 (5): 509-518.
- TIWARI G.N. (2002). Solar Energy : Fundamentals, Design, Modelling and Applications. CRC Press. Boca Raton. 525 pp.
- UNIDO: UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. (2001) Composting of tannery sludge. Regional Programme for pollution control in the tanning industry in South-East Asia. Report no. US/RAS/92/120. November 2001. Chennai, India.
- VALSARAJ P. (2002). An experimental study on solar distillation in a single slope basin still by surface heating the water mass. Renewable Energy. 25 (4): 607-612.
- WATSON J.T.R., R.S. BASU et J.V. SENGERS. (1980). An Improved Representative Equation for the Dynamic viscosity of Water Substance. J. Phys. & Chem. Ref. Prop. 9 (4): 1255-1290.
- WHITE F.M. (1991). Heat and Mass Transfer. Addison-Wesley Publishing. Reading, Mass, USA. 718 pp.
- W.R.D.C. World Radiation Data Center. [En ligne] Site maintenu par le World Meteorological Organization, St-Petersburg, Russie. <http://wrdc-ngo.nrel.gov/> (Page consultée en mai 2003)
- YATRIBI A. et A. NEJMEDDINE. (2000). Impact écotoxocologique du traitement chimique des eaux usées de tanneries : analyse technico-économique. Revue des Sciences de l'Eau. 13 (2) : 107-118.

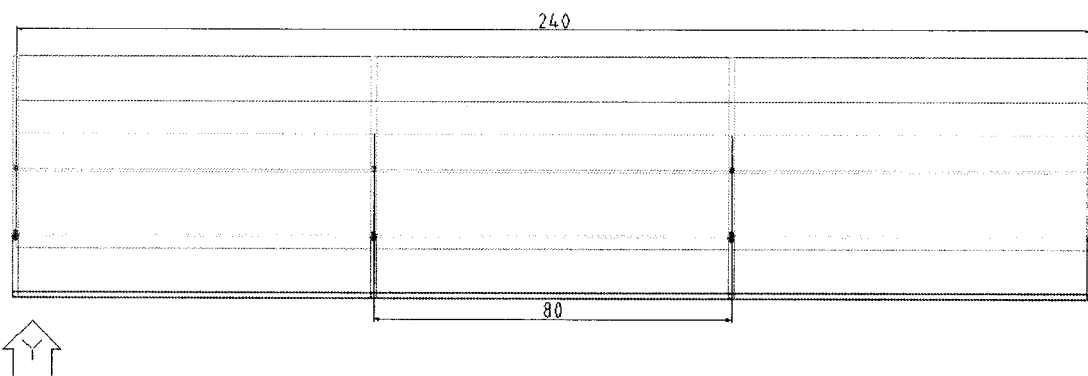
ZHANG Z. et PATE M.B. (1988). A Methodology for Implementing a Psychrometric Chart in a computer Graphics System. ASHRAE Transactions. Vol. 94. Pt. 1.

Annexe A

Plans du distillateur



1. Coupe de l'évaporateur (dimensions en cm)



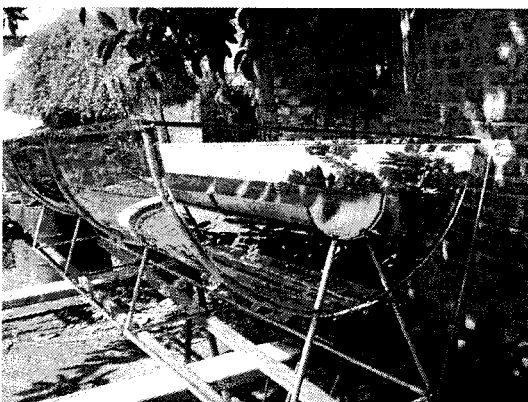
1. Élévation de l'évaporateur (dimensions en cm)

Annexe B

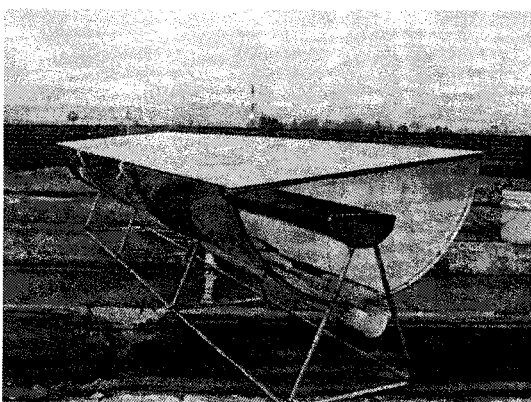
Photos des prototypes



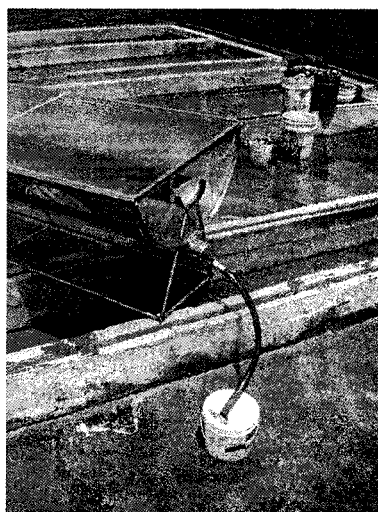
1. La tannerie, vue de l'intérieur



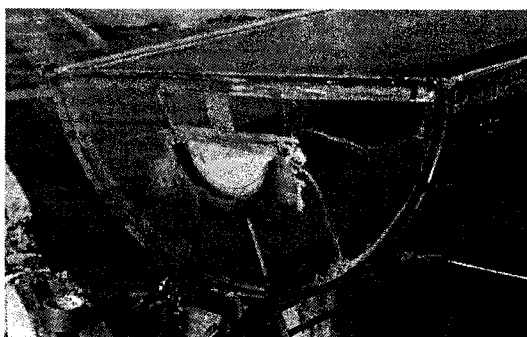
2. Construction de l'évaporateur



3. Évaporateur assemblé sur le toit.



4. Récupération de l'eau distillée



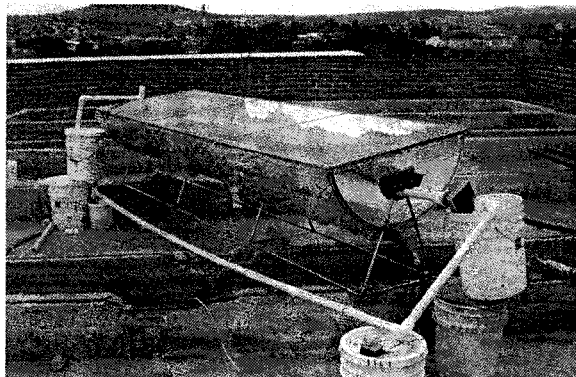
5. Résultat d'une mini-tornade



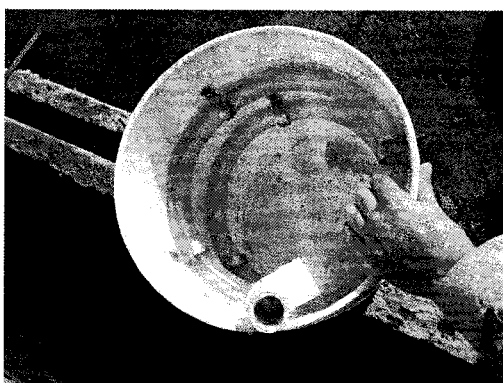
6. Isolation de polyuréthane



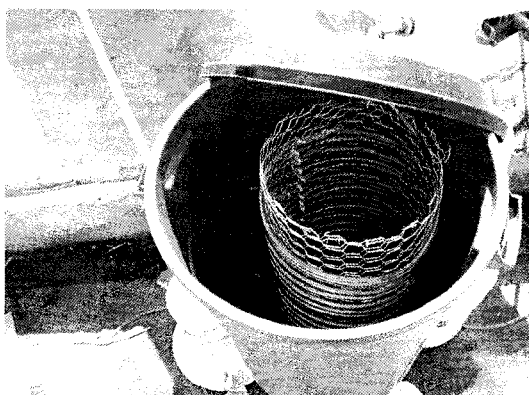
7. Couvercle semi-fermé



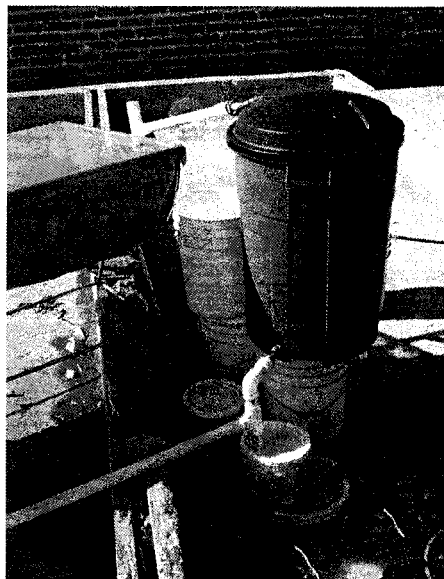
8. 1^{er} Système de circulation d'air et condensateur 1.



9. Détails du condensateur 1



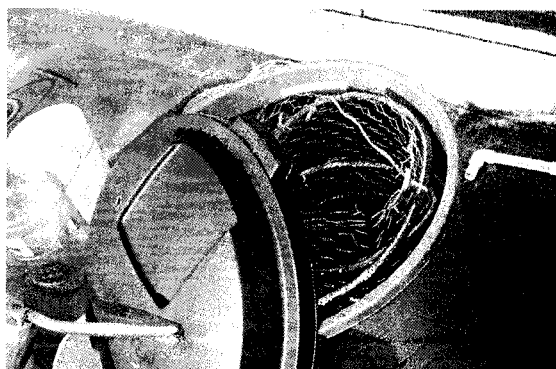
10. Détails du condensateur 2



11. Installation du condensateur 2



12. Canal fermé et condensateur 2



13. Condensateur 3